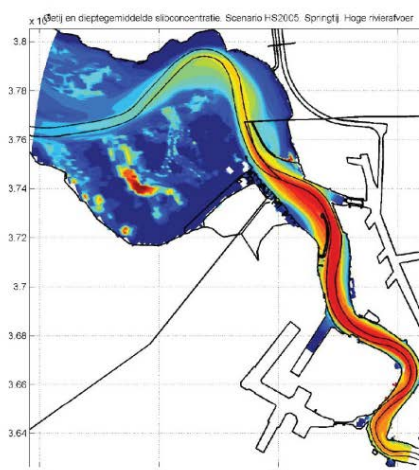


Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie



LTV – Veiligheid en Toegankelijkheid Samenhang ontwikkelingen tijd- en ruimteschalen Basisrapport kleinschalige ontwikkeling K-17

01 oktober 2013

Colofon

International Marine & Dredging Consultants

Adres: Coveliersstraat 15, 2600 Antwerpen, België

☎: + 32 3 270 92 95

📠: + 32 3 235 67 11

Email: info@imdc.be

Website: www.imdc.be

Deltares

Adres: Rotterdamseweg 185, 2600 MH Delft, Nederland

☎: + 31 (0)88 335 8273

📠: +31 (0)88 335 8582

Email: info@deltares.nl

Website: www.deltares.nl

Svašek Hydraulics BV

Adres: Schiehaven 13G, 3024 EC Rotterdam, Nederland

☎: +31 10 467 13 61

📠: +31 10 467 45 59

Email: info@svasek.com

Website: www.svasek.com

ARCADIS Nederland BV

Adres: Nieuwe Stationsstraat 10, 6811 KS Arnhem, Nederland

☎: +31 (0)26 377 89 11

📠: +31 (0)26 377 85 60

Email: info@arcadis.nl

Website: www.arcadis.nl

Document Identificatie

Titel	Samenhang ontwikkelingen tijd- en ruimteschalen
Project	Instandhouding vaarpassen Schelde Milieuvergunningen terugstorten baggerspecie
Opdrachtgever	Afdeling Maritieme Toegang - Tavernierkaai 3 - 2000 Antwerpen
Bestek nummer	16EF/2010/14
Documentref	I/RA/11387/13.086/GVH
Documentnaam	K:\PROJECTS\11\11387 - Instandhouding Vaarpassen Schelde\10-Rap\Op te leveren rapporten\Oplevering 2013.10.01\K-17 - Samenhang ontwikkelingen tijd- en ruimteschalen_v2.0.docx

Revisies / Goedkeuring

Versie	Datum	Omschrijving	Auteur	Nazicht	Goedgekeurd
1.0	31/03/2013	Klaar voor revisie	J. Cleveringa	GVH	
2.0	01/10/2013	Finaal	J. Cleveringa	GVH	

Verdeellijst

1	Analoog	Youri Meersschaut
1	Digitaal	Youri Meersschaut

SAMENHANG IN ONTWIKKELINGEN OP VERSCHILLENDE TIJD- EN RUIMTESCHALEN

PROJECT LTV VEILIGHEID EN TOEGANKELIJKHEID;
LTV V&T-RAPPORT K-17

29 augustus 2013
: - Definitief
A2666.

Inhoud

1	Factsheets.....	5
1.1	Samenhang met andere rapporten	5
1.2	Opbouw van het rapport	5
1.3	Doel.....	5
2	Deel A Sinks en sources.....	6
2.1	Inleiding.....	6
2.2	A en P	6
2.3	Sinks en sources	7
2.4	Sedimenttransport	8
2.5	Terugkoppelingen.....	8
2.6	Samenvattend	9
3	Waterstanden en het sediment.....	10
3.1	Waarnemingen.....	10
3.2	Waterstanden en het kombergingsvolume.....	10
3.3	Samenvattend	14
4	Rivieraanvoer.....	15
4.1	Inleiding.....	15
4.2	Debieten	15
4.3	Source van fijn sediment.....	17
5	Historische ontwikkeling Scheldebekken (tot ca. 1800)	18
5.1	Kader	18

5.2	Van rivier(tjes) tot estuarium	18
5.3	Toename van het kombergingsareaal	20
5.4	Herverdeling sediment	22
5.5	Stapsgewijze ontwikkeling	22
5.6	Conclusies	23
6	Het Schelde-estuarium van ca. 1800 – ca. 1950	24
6.1	Afbakening	24
6.2	Sinks in de zijarmen, source in de geul	24
6.3	Ingrepen in de vaarweg	25
6.4	Rechttrekken en vastleggen	27
6.5	Conclusies	28
7	Het Schelde-estuarium de afgelopen 60 jaar	30
7.1	Waar gaat het in dit hoofdstuk om?	30
7.2	Geometrie van de Beneden Zeeschelde	30
7.3	Geometrie van de Westerschelde	34
7.4	Onttrekkingen van sediment: een antropogene sink	37
7.5	Conclusies	39
8	Platen als sinks	40
8.1	Inleiding	40
8.2	Platen als sinks	40
8.3	Plaathoogte en areaal	41
8.4	De rol van de slikken en de schorren	43
8.5	Conclusies	44
9	Sinks en sources in de toekomst	45
9.1	Inleiding	45
9.2	Uitgangspunten en Aannames	45

9.3	Scenario's en ontwikkelingen.....	46	
9.4	Oorzaak of gevolg?	46	
10	Deel B Inleiding	48	
10.1	Varia	48	
11	Plaathoogte	49	
11.1	Inleiding	49	
11.2	Plaathoogte in ruimte en tijd	49	
11.3	Andere factoren?	50	
11.4	Conclusies	53	
12	Drempels en de vorming van kortsluitgeulen	54	
12.1	Aanleiding	54	
12.2	Ontstaan van kortsluitgeulen	54	
12.3	Beheermaatregelen?	57	
13	Geulen in hun nadagen.....	58	
13.1	Aanleiding	58	
13.2	Geul van Baarland	58	
13.3	Geul Zimmerman.....	59	
13.4	Beheermaatregelen	59	
14	Veranderingen in de geometrie van de plaatcomplexen en de toename van het hoogdynamische areaal	61	
14.1	Inleiding	61	
14.2	Schematisatie plaat	63	
14.3	Van twee kleine platen naar één grote plaat	64	
14.4	Discussie.....	65	
14.5	conclusie.....	66	

15 Fysische betekenis van droogvalduur-percentages	67
15.1 Inleiding	67
15.2 Fysische verschillen	67
15.3 Conclusies	69
16 Referenties.....	70

1 Factsheets

1.1 SAMENHANG MET ANDERE RAPPORTEN

Een samenhangende set van drie rapporten is opgesteld in het kader van LTV Veiligheid en Toegankelijkheid, met als werktitel 'factsheets'. De rapporten brengen in beeld welke morfologische veranderingen zich afspelen in het Schelde estuarium op de mesoschaal. Er zijn beschrijvende rapporten op het niveau van macrocellen van de Westerschelde (rapport K-16) en op de mesoschaal in de Zeeschelde en zijrivieren (rapport K-18). Dit rapport gaat in op de samenhang op verschillende tijd en ruimteschalen en bevat aanvullende beschouwingen en analyses opgenomen die op grotere (overkoepelende) tijd- en ruimteschalen spelen dan de mesoschaal.

1.2 OPBOUW VAN HET RAPPORT

Deel A Sinks en Sources

In hoofdstuk 2 tot en met 8 ligt de nadruk op de bronnen (sinks) en putten (sources) van sediment op verschillende tijdschalen. In hoofdstuk 9 worden de consequenties van deze benadering doorgetrokken naar de toekomst.

Deel B Varia

In de hoofdstukken daarna komen vier aspecten van de morfologische ontwikkeling op mesoschaal aan de orde, die in enkele delen van het estuarium spelen:

1. Drempels en de vorming van kortsluitgeulen;
2. Geulen in hun nadagen;
3. Veranderingen in de geometrie van de plaatcomplexen en de toename van het hoogdynamische areaal;
4. Fysische betekenis van ecotopen.

1.3 DOEL

Het doel van het voorliggende rapport is om, op basis van waarnemingen, bijdragen te leveren aan het conceptuele model voor de ontwikkelingen op verschillende tijd- en ruimteschalen van het Schelde-estuarium.

Met een goed begrip van de werking van het estuarium kunnen ook in de toekomst de noodzakelijke ingrepen, bijvoorbeeld ten behoeve van het beheer van de vaarweg, zo worden uitgevoerd dat tegelijkertijd de lange-termijn doelstellingen voor het estuarium worden gediend.

2

Deel A Sinks en sources

2.1 INLEIDING

Sedimenthuishouding en waterhuishouding (getij, zoetwaterafvoer) van het Schelde-estuarium bepalen samen de fysische ontwikkeling. Een van de manieren om de sedimenthuishouding te beschouwen is om de bronnen van het sediment, of de 'sources' en de plekken waar sediment wordt afgezet, of de 'sinks' of 'accommodation' te beschouwen (zie bijvoorbeeld Schlager, 1993 voor beschrijving hiervan op geologische tijdschalen). In het Schelde-estuarium bestaat het sediment uit zand en slib en op de langere tijdschalen ook uit veen.

2.2 A EN P

Uitgangspunt in de beschouwing van de sinks en sources is de relatie tussen de omvang (doorstroomoppervlakte) van geulen en de hoeveelheid water die er doorheen stroomt (kombergingsvolume, getijprisma, kenmerkende debiet). Van deze relatie bestaan veel verschillende varianten (zie bijvoorbeeld de overzichten in Defra, 2006; Hughes, 2002 en Eysink en Biegel, 1992). Ze zijn in essentie uit te schrijven als:

$$A = C \times P^n$$

Waarin

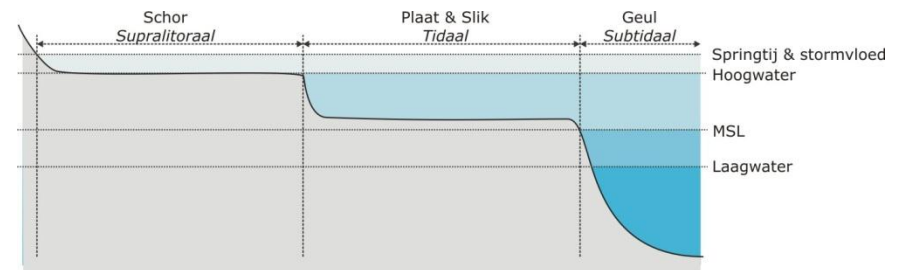
A = Doorstroomoppervlakte;

P = Getijdeprisma, getijdevolume, karakteristieke getijvolume of -debiet;

C; n = empirisch bepaalde coëfficiënten.

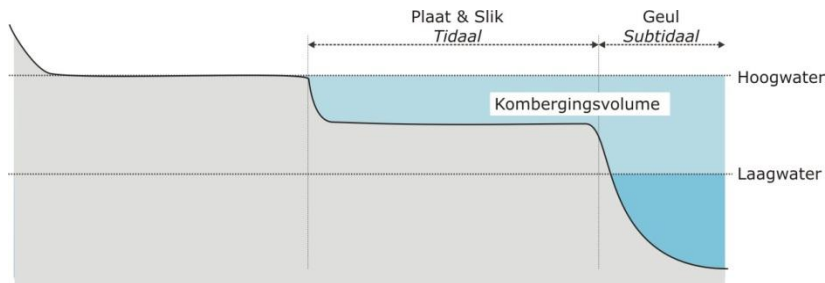
Voor de analyse in dit rapport is het niet van belang specifieke waarden te hanteren voor C en n. Ook is het niet belangrijk welke maat voor P wordt gehanteerd.

Wel is een belangrijk uitgangspunt dat P wordt bepaald door de komberging in gebieden die bij normale hoogwaters onder water staan (figuur 2.1). Het kombergingsvolume P dat bepalend is voor de omvang A van de geul (*subtidaal*) omvat het kombergingsvolume zowel boven de geulen zelf als boven de intergetijdegebieden (*het tidaal*). De aanname is dat kwelders (*supratidaal*) niet bijdrage aan het kombergingsvolume.



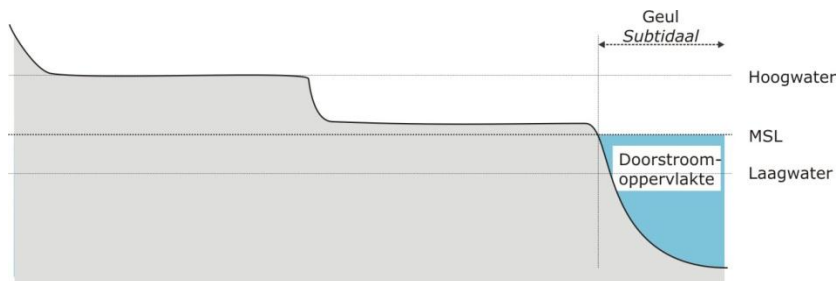
Figuur 2.1 Morfologische definities samenhangend met het getij

Figuur 2.2 is een schematische dwarsdoorsnede, waarin is aangegeven dat het subtidaal en het tidaal bijdragen aan het kombergingsvolume P, waarbij de niveaus van het hoog- en laagwater medebepalend zijn.



Figuur 2.2 Schematische weergave van het kombergingsvolume

In figuur 2.3 is schematisch het doorstroomoppervlak A van de geul weergegeven, onder het gemiddeld zeeniveau (MSL).



Figuur 2.3 Schematische weergave van de doorstroomoppervlakte

In de bovenstaande figuren zijn steeds dwarsdoorsneden weergegeven. Het kombergingsvolume wordt bepaald door het gebied dat zich uitstrekt over het achterliggend kombergingsareaal.

2.3 SINKS EN SOURCES

Bij veranderingen in hun omvang gaan de geulen, platen en slikken een rol spelen als sink dan wel source voor sediment:

- Bij een toename van de omvang van de geulen, dus bij een toename van de doorstroomoppervlakte, fungeert de geul als een source van sediment;
- Omgekeerd fungeren de geulen als een sink bij een afname van de doorstroomoppervlakte;
- Platen en slikken kunnen fungeren als sink, waarbij de omvang van het kombergingsvolume afneemt;
- Omgekeerd kunnen de platen en slikken optreden als source, waarbij het kombergingsvolume toeneemt.

Kwelders (supratidaal) vormen een sink voor sediment. Sedimentatie die bovenop de kwelders plaatsvindt, waarbij dus geen sprake is van een uitbreiding van het kwelderareaal, heeft geen effect op het kombergingsvolume.

Uitgaande van de relatie tussen het kombergingsvolume (figuur 2.2) en de doorstroomoppervlakte (figuur 2.3) volgt dat de ontwikkelingen van platen, slikken enerzijds en geulen anderzijds sterk zijn gekoppeld.

- Bij een toename van het kombergingsvolume, bijvoorbeeld doordat erosie plaatsvindt, zal ook de doorstroomoppervlakte van de geulen moeten toenemen, zodat ze een source vormen.
- Omgekeerd zal bij een afname van het kombergingsvolume door sedimentatie op de platen en slikken, de doorstroomoppervlakte van de geulen moeten afnemen, zodat deze een sink vormen.

In de volgende hoofdstukken zullen deze relaties verder worden verkend en zal onder meer worden bekeken veranderingen in de waterstanden gevolgen hebben voor de rol als sink en source van de geulen en de platen en slikken.

Bovenstaande heeft betrekking op de herverdeling van sediment in geulen, platen en kwelders. Daarnaast vond en vindt in het Schelde-estuarium aanvoer

van sediment plaats via de (zij)rivieren. Deze source van sediment wordt ook beschouwd. Verder heeft in het Holocene verleden veengroei plaatsgevonden. Veen wordt niet aangevoerd en afgezet, zoals zand en klei, maar ontstaat door de accumulatie van plantaardig materiaal. Omdat het in het verleden een belangrijke rol speelde bij het opvullen van (potentieel) kombergingsvolume en omdat het verwijderen van veen door mensen een belangrijke rol heeft gespeeld bij de historische ontwikkeling van het estuarium, zal het ter sprake komen in de komende hoofdstukken. Verder vindt uitwisseling van zand en slib plaats met de monding, die dus kan fungeren als source of sink.

2.4 SEDIMENTTRANSPORT

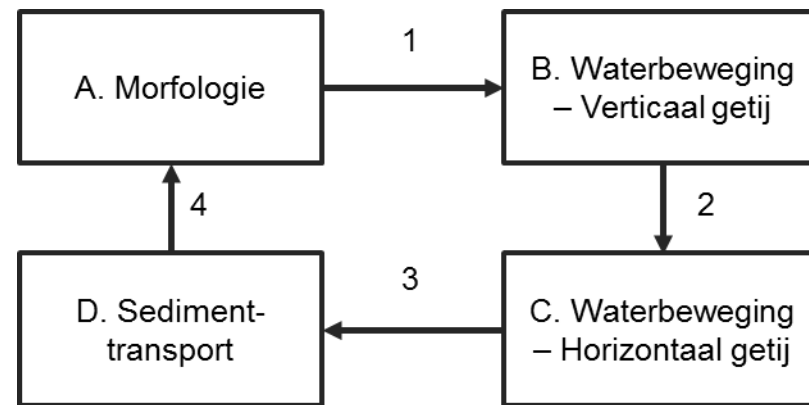
In Van den Berg (1996) wordt beredeneerd dat er mogelijk twee stadia zijn in de ontwikkeling van getijdebekken en estuaria: een stadium waarin de sedimentatie van slib overheerst en een stadium waarin de sedimentatie van zand overheerst. Deze fasering zou gekoppeld kunnen zijn aan de dominante transportmechanismen, waarbij asymmetrie in het getij een belangrijke rol speelt bij het transport van zand en de verschillende 'lag'¹-effecten bij slib.

In dit rapport wordt nog een stap verder gegaan, door als uitgangspunt te nemen dat, als er een sink, dan wel source aanwezig is, het sedimenttransport hoe dan ook zal plaatsvinden. Met andere woorden: het transport van sediment is niet beperkend voor de morfologische ontwikkelingen.

¹ 'Lag' effecten is afgeleid van 'settling-lag', zoals beschreven door van Straaten en Kuenen (1957) en Postma (1967) in samenhang met enkele andere effecten die leiden tot landwaarts transport van fijn sediment in getijdebekken.

2.5 TERUGKOPPELINGEN

Een kenmerkend onderdeel van de morfodynamiek zijn de terugkoppelingen tussen de bodemligging, de waterbeweging, het resulterende sedimenttransport en de veranderingen in de bodemligging.



Figuur 2.4 Schematische weergave van de morfodynamische terugkoppeling (naar de Vriend, 1991).

Deze terugkoppelingen bestaan op verschillende tijd- en ruimteschalen. In essentie hangt, vanwege deze terugkoppelingen, 'alles met alles samen' in de waterbeweging en de morfologie van het estuarium. Een dergelijke integrale samenhang leent zich echter lastig voor analyses. Vandaar dat hier de integrale samenhang en terugkoppelingen buiten beschouwing blijft. De terugkoppelingen tussen de morfologie, het verticale en het horizontale getij komen expliciet aan de orde in LTV V&T-rapport G-13. In modelstudies komen de terugkoppelingen impliciet aan de orde omdat de terugkoppelingen uit figuur 2.4 het hart zijn van morfologisch modellen.

In de analyse in dit rapport wordt één terugkoppeling onder de loep genomen: de relatie tussen het kombergingsvolume (aangeduid met P) en het doorstroomoppervlakte van de geulen (aangeduid met A). Het is een kwalitatieve analyse. De exacte invulling van de relatie tussen A en P is dus minder van belang. Zo worden lastige discussies, bijvoorbeeld over de verschillen in de relatie tussen A & P in een meergeulensysteem en een enkelgeulensysteem, vermeden. Van belang is alleen dat A evenredig is met P. Een toename van het kombergingsvolume betekent dus een toename van het doorstroomoppervlak. En omgekeerd betekent een afname van het kombergingsvolume dat het doorstroomoppervlakte kleiner behoort te zijn.

Het kombergingsvolume wordt gedefinieerd als het watervolume dat wordt geborgen tussen laag- en hoogwater (figuur 2.2). Dit volume direct toepassen in de relatie met het doorstroomoppervlak betekent dat voorbij wordt gegaan aan bijvoorbeeld het effect van de asymmetrie van de voortplantingssnelheid in hoog- en laagwater (Van der Spek, 1994, Van den Berg e.a. 1996, Huijs & Storm, 1997). Voor een eerste orde analyse is het echter voldoende, juist omdat het eenvoudige beschouwingen levert.

Het doorstroomoppervlak wordt in deze analyse gedefinieerd als het watervolume onder het gemiddelde zeeniveau (MSL, figuur 2.3). Ook hiervoor geldt dat het een vereenvoudiging is, waarbij het gemiddelde zeeniveau gelijk wordt gesteld aan het middenstandsvlak. Ook hier geldt dat dit voor een eerste analyse dit een acceptabele vereenvoudiging is.

2.6 **SAMENVATTEND**

De nadruk ligt op sinks en sources van sediment en veranderingen daarin in de tijd. Het transport van sediment wordt verondersteld geen beperkende factor te zijn voor de morfologische ontwikkelingen. De relatie tussen kombergingsvolume en doorstroomoppervlakte is de basis voor de analyse.

3 Waterstanden en het sediment

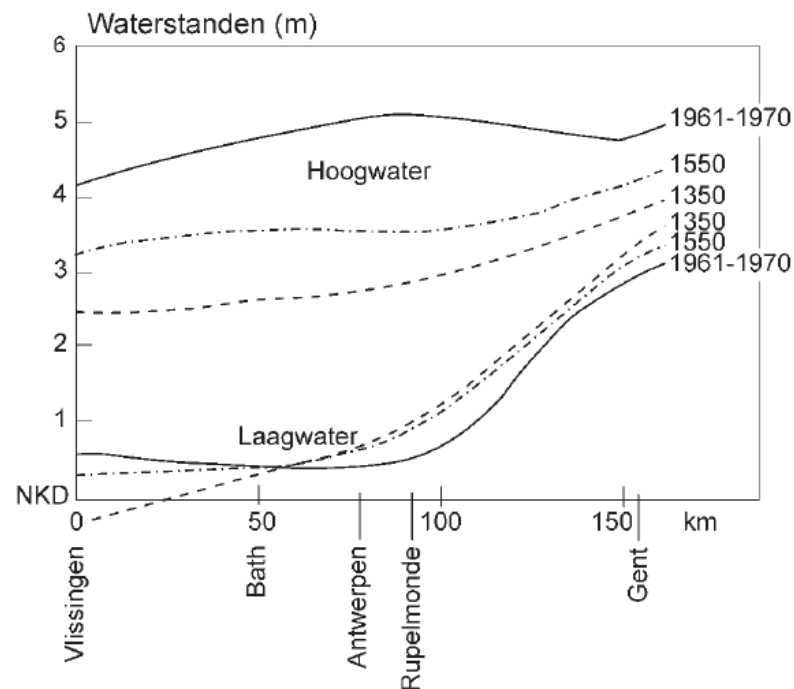
3.1 WAARNEMINGEN

De historische ontwikkeling in de hoog- en laagwaterstanden in het Schelde-estuarium zijn gerapporteerd in Coen (1988) en in aantal publicaties die daarop voortborduren (van der Spek, 1994; Coen 2008, LTV V&T-rapport G-8). De waarnemingen zijn samengevat in figuur 3.1. Het niveau van hoogwater is in het gehele Schelde-estuarium toegenomen. Het niveau van laagwater is landwaarts vanaf Bath afgenomen. In het gehele estuarium is de getijslag toegenomen. De locatie met het hoogste hoogwater is gaandeweg landwaarts geschoven. Ook de snelheid waarmee het hoogwater door het estuarium verplaatst is toegenomen. Naast de verandering van de hoog- en laagwaters is ook de gemiddelde (relatieve) zeespiegel gestegen, zoals onder andere is gedocumenteerd in Kiden (1995) en Dillingh (2006).

In de voorliggende analyse is het niet belangrijk waarom de waterstanden zijn veranderd, deze veranderingen worden als een gegeven beschouwd.

3.2 WATERSTANDEN EN HET KOMBERGINGSVOLUME

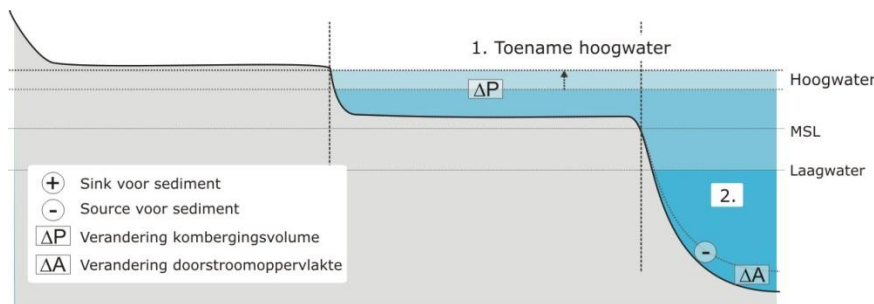
In deze paragraaf wordt ingegaan op het effect van de veranderingen in het verticale getij en de zeespiegel op de sinks en sources van sediment.



Figuur 3.1 Waterstanden in het Schelde-estuarium (Coen, 2008)

Toename hoogwater

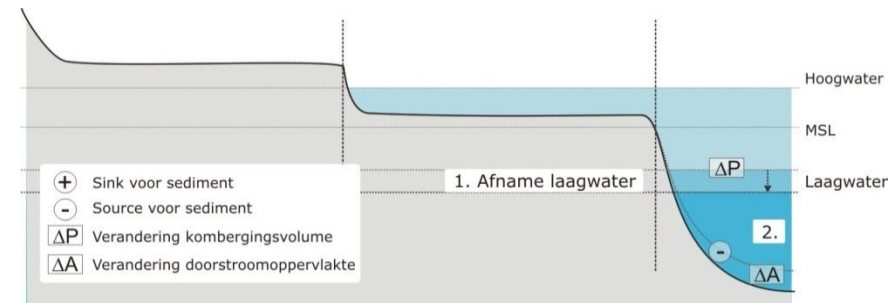
Bij een toename van de hoogwaterstanden neemt het kombergingsvolume op de platen en in de geulen toe (figuur 3.2). Bij een groter kombergingsvolume P hoort een groter doorstroomoppervlakte A . Het gevolg van de toename van P is dat de geulen als een bron van sediment gaan fungeren, omdat het doorstroomoppervlak zal moeten toenemen (2 in figuur 3.2).



Figuur 3.2 Schematische weergave van het effect van toename van de hoogwaterstanden op de komberging.

Afname laagwater

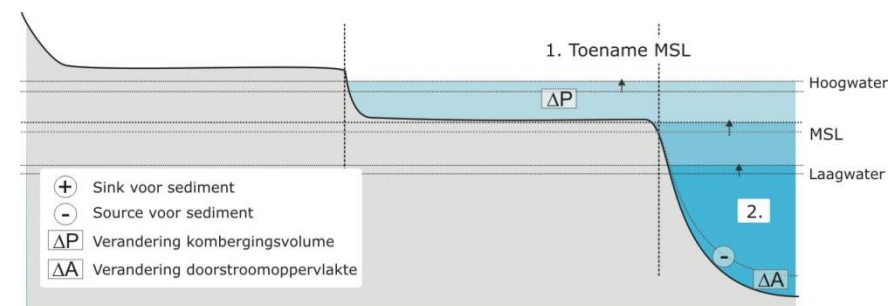
Net als bij een toename van het niveau van hoogwater, betekent ook het afnemen van het niveau van laagwater dat het kombergingsvolume P toeneemt, omdat het niveauverschil tussen hoog- en laagwater toeneemt (figuur 3.3). En ook hier betekent het grotere kombergingsvolume P dat een toename van het doorstroomoppervlakte A noodzakelijk is. Het gevolg van de afname van het niveau van laagwater is dan ook dat, via de toename van P , de geulen als een bron van sediment gaan fungeren, zodat het doorstroomoppervlakte toeneemt (2 in figuur 3.3).



Figuur 3.3 Schematische weergave van het effect van afname van de laagwaterstanden op de komberging.

Toename relatieve zeespiegelstand

Bij een toename van de gemiddelde zeespiegel, waarbij de niveaus van laag- en hoogwater beiden evenveel toenemen, is in een gebied met droogvallende platen en slikken sprake van een toename van het kombergingsvolume (figuur 3.4). De toename van het watervolume boven de platen bij hoogwater wordt dan namelijk niet gecompenseerd door de veranderingen in het watervolume bij de laagwaterstanden. In de geulen gaan beide veranderingen gelijk op en daarom geldt deze verandering alleen voor situatie met droogvallende platen.



Figuur 3.4 Schematische weergave van het effect van toename van het gemiddelde zeeniveau (MSL) op de komberging.

Bij toename van de gemiddelde zeespiegel neemt ook de doorstroomoppervlakte van de geul toe, die immers begrensd werd door dat niveau (figuur 2.3). Als de toename van de doorstroomoppervlakte kleiner is dan passend bij het toegenomen kombergingsvolume, dan zal de geul als bron van sediment dienen (2 in figuur 3.4). Als de toename van de doorstroomoppervlakte groter is dan passend bij het toegenomen kombergingsvolume, dan zal de geul kleiner moeten worden, zodat deze als sink fungeert. Ook een evenwicht tussen de toename van de doorstroomoppervlakte (gerealiseerd door de stijging van het zeeniveau) en de voor het nieuwe kombergingsvolume benodigde doorstroomoppervlakte is mogelijk.

Doorslaggevend voor de status van sink of source van de geul bij de stijging van de gemiddelde zeespiegel is de relatieve omvang van intergetijdegebied in verhouding tot de geul. Bij een brede geul met een smal intergetijdegebied zal de geul als sink fungeren, terwijl bij een smalle geul met een breed intergetijdegebied de geul als bron zal dienen.

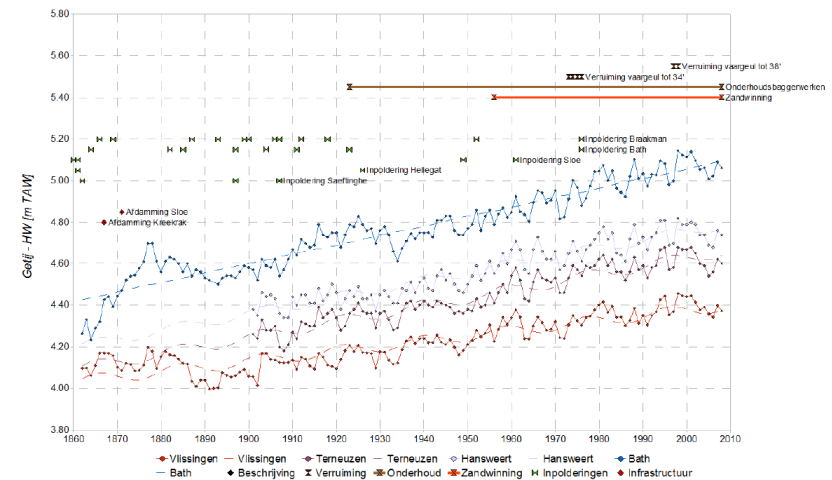
Samenhang

In de bovenstaande beschrijving zijn de effecten op de komberging van de toename van hoog- en laagwater en de gemiddelde zeespiegelstand los van elkaar beschouwd. In werkelijkheid bestaat de verandering van de gemiddelde zeespiegelstand uit een verandering van zowel hoog als laagwater.

In het Schelde-estuarium zijn de veranderingen in de niveaus van hoog- en laagwater in de stroomopwaartse delen van het estuarium anders dan bij de monding (figuur 3.1), zie onder andere Coen (1988 & 2008), Plancke e.a. (2012), Van Braeckel e.a. (2012), LTV V&T-rapport G-8.

De toename van het hoogwater domineert in grote delen van het estuarium (figuur 3.5 en figuur 3.6). Zoals hierboven is getoond zal dit leiden tot een groter kombergingsvolume. Let wel: dit is bij gelijkblijvende arealen schor, plaat en slik en geul, de effecten van morfologische veranderingen komen in de volgende

hoofdstukken aan de orde. In deze situatie hebben de geulen een rol als bron (source) van sediment vervuld.

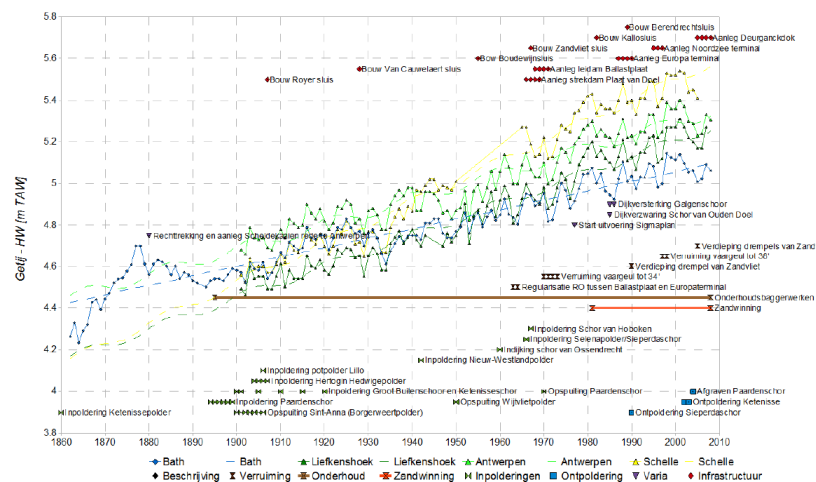


Figuur 3.5 Ontwikkeling van het hoogwater in de Westerschelde (Plancke e.a., 2012; locaties in figuur 3.9)

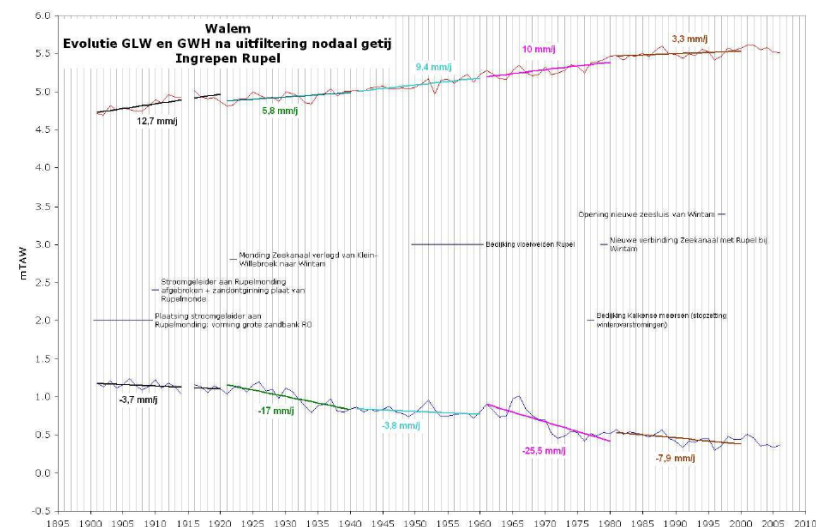
In de meer stroomopwaarts gelegen delen (Rupel, figuur 3.7 en boven Zeeschelde, figuur 3.8) heeft ook een belangrijke verlaging van het laagwater plaatsgevonden, die in de bepaalde perioden sterker is geweest dan de toename van het hoogwater. Ook daar heeft, door de waterstandsveranderingen (wederom zonder de arealen te beschouwen), een toename van de komberging plaatsgevonden. Dat betekent dat ook in deze gebieden de geulen een rol als source hebben.

Overigens heeft deze ontwikkeling van het hoog- en laagwater niet in alle zijrivieren op dezelfde wijze plaatsgevonden. In de Durme is de stijging van het niveau van laagwater zo groot geweest dat het niveau van laagwater beduidend sterker is toegenomen dan het niveau van hoogwater. De getijslag in de Durme is

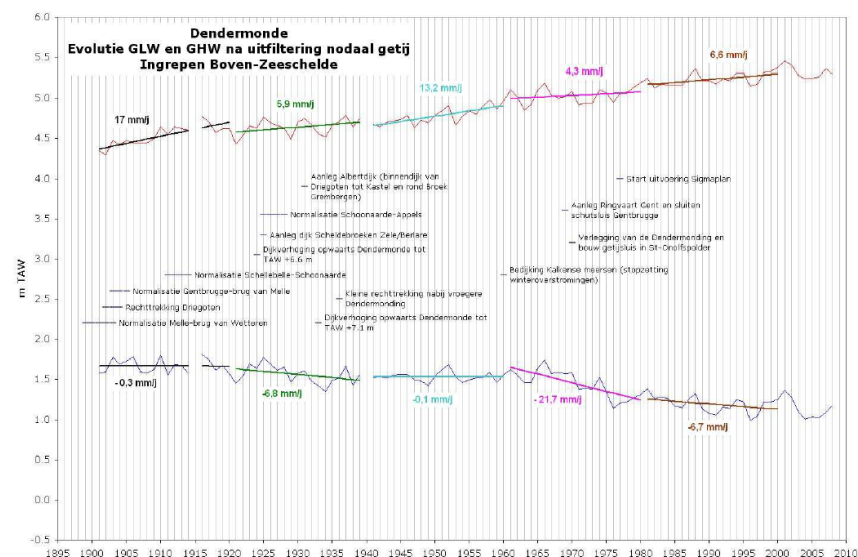
daarmee kleiner geworden. De relatief sterke toename van het niveau van laagwater is een ontwikkeling die omgekeerd is aan de ontwikkeling die is getoond in figuur 3.3. Het gevolg is dat het kombergingsvolume van de Durme is afgenomen. De geul heeft in de Durme een rol als sink.



Figuur 3.6 Ontwikkeling van het hoogwater in de Zeeschelde (Plancke e.a., 2012; locaties in figuur 3.9)



Figuur 3.7 Ontwikkeling van het hoog- en laagwater in de Rupel te Walem (Van Braeckel e.a. concept 2012), locatie in figuur 3.9



Figuur 3.8 Ontwikkeling van het hoog- en laagwater in de Boven-Zeeschelde te Dendermonde (Van Braeckel e.a. concept 2012), locatie in figuur 3.9



Figuur 3.9 Locaties van een aantal waterstandstations in het Schelde-estuarium.

3.3 SAMENVATTEND

Een eenvoudige beschouwing van de relatie tussen waterstand, komberging en doorstroomoppervlakte leert dat bij de geobserveerde veranderingen van de waterstanden in het Schelde-estuarium de geulen vrijwel overal een rol hebben gespeeld als bron van sediment.

4

Rivieraanvoer

4.1 INLEIDING

In de huidige situatie is de aanvoer van zoetwater naar het Schelde-estuarium sterk gereguleerd, onder andere om wateroverlast in het achterland te beperken. Dit betekent dat tegenwoordig bij hoge afvoeren vanuit het achterland een groot deel van het zoete water via het Kanaal Gent-Terneuzen naar de Westerschelde wordt afgevoerd. Ook is er sinds 1986 een aanvoer van zoetwater uit de Rijn-Maas-delta bijgekomen, via de Bathse spuisluis.

De veranderingen in de rivieraanvoer hebben gevolgen gehad voor verschillende waterkwaliteitsaspecten (saliniteit, nutriëntenhuishouding), maar ook voor de aanvoer van sediment uit het achterland. Vanwege de regulering van de afvoer is de aanvoer van sediment uit het achterland hoogstwaarschijnlijk kleiner geworden. Het is lastig of zelfs onmogelijk om de verandering in aanvoer van sediment te kwantificeren, enerzijds vanwege het ontbreken van gegevens, anderzijds omdat de veranderingen in de aanvoer (afdammingen, graven van kanalen en grachten) al vroeg in de geschiedenis van de Schelde zijn begonnen. Hierbij hoort ook de kanttekening dat uit de archeologie en geologie aanwijzingen bekend zijn van ingrijpende veranderingen in de water- en

sedimentafvoer in het Scheldebekken in het neolithicum (van Strydonck & de Mulder, 2000).

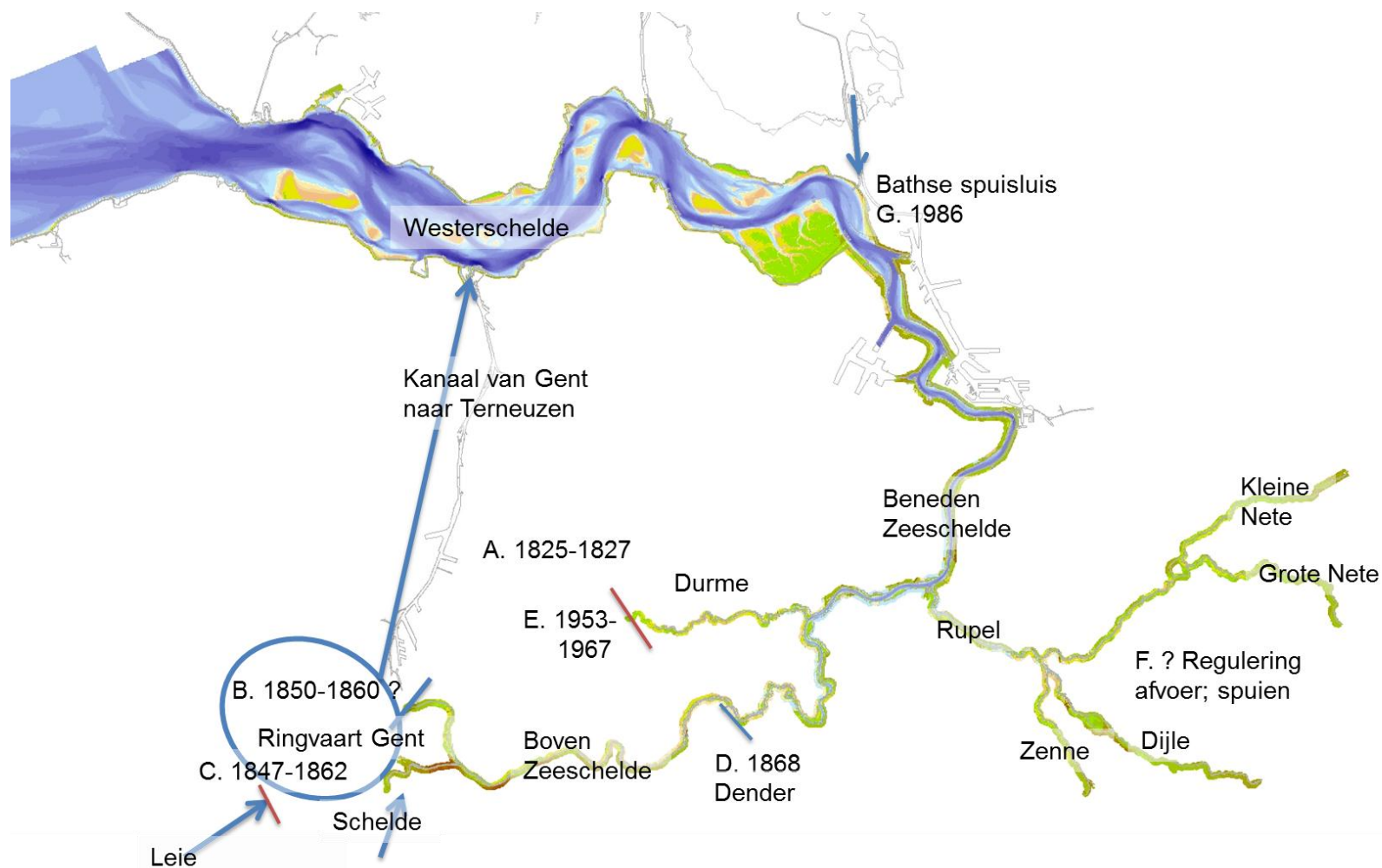
4.2 DEBIETEN

De Schelde en haar zijrivieren zijn regenrivieren. Het debiet wordt gestuurd door de neerslag in het stroomgebied (Coen, 1988 & 2008). Dit zoetwaterdebiet is en was klein ten opzichte van het getijdebiet. In de afgelopen eeuwen is de saliniteitsverdeling (ruimtelijk) en -variatie (temporeel) veranderd, vanwege wijzigingen in debiet en debietverdeling. Vooral de veranderde afvoer rond Gent heeft duidelijke gevolgen gehad, zowel voor de indringing van het getij, als voor de variaties in de aanvoer van zoetwater. Tegenwoordig vindt een relatief grote aanvoer plaats in het goed gemengde deel van het estuarium rond Bath en Terneuzen. De afvoer via de oorspronkelijke rivierarmen is afgenomen.

De jaargemiddelde afvoer vanuit de rivieren is ongeveer 120 m³/s (gecombineerd bovendebiet te Rupelmonde), tegenover een jaargemiddelde afvoer van 23 m³/s bij Bath en 13 m³/s bij Terneuzen. Met de ingebruikname van de Bathse spuisluis in 1986 ontstond een nieuwe aanvoer van zoet (nutriëntenrijk) water, vanuit het stroomgebied van de Maas en Rijn. De afvoer bij Terneuzen is gerelateerd aan piekafvoeren, want ze is gericht op het voorkomen (beperken) van wateroverlast in Vlaanderen. In vergelijking met de situatie voor de ingebruikname van het Kanaal Gent-Terneuzen en de gewijzigde afvoerverdeling rond Gent betekent dit dat de zoetwateraanvoer bij piekafvoeren kleiner is geworden.

Figuur 4.1 toont een kaart van het Schelde-estuarium met de verschillende reguleringswerken. Het gaat daarbij om

- A: Aanleg Kanaal Gent-Terneuzen en einde afvoer Durme;
- B: Stuw te Gentbrugge;
- C: Graven afdammingkanaal van de Leie;
- D: Bouw stuw Dender (later verplaatst);



Figuur 4.1 Overzicht van werken die de afvoerverdeling van zoetwater naar het Schelde-estuarium hebben beïnvloed.

E: Verplaatsing afdamming Durme;
F: Regulering Rupel en zijrivieren
G: Aanleg en ingebruikname Bathse Spuisluis.

4.3 SOURCE VAN FIJN SEDIMENT

Met de gewijzigde aanvoer van het water door de verschillende afdammingen en reguleringswerken is waarschijnlijk ook de aanvoer van sediment naar de Zeeschelde gewijzigd. Dit lijkt vooral van belang voor de aanvoer van fijn sediment (slib). Vanwege het karakter van de aanvoerrivieren (beperkt verhang en debiet, niet overal siliciklastisch materiaal in het hinterland), is het namelijk minder waarschijnlijk dat deze een belangrijke bron van zand zijn geweest. Een andere factor die relatief recent voor een verandering in de aanvoer van slib zorgde, is de ingebruikname van verschillende rioolwaterzuiveringsinstallaties, waardoor de aanvoer van rioolslib naar de zijrivieren sterk is afgenomen. Voor de sedimenthuishouding moet wel bedacht dat vooral de anorganische fractie in het slib van belang is voor de sedimentatie en dat deze slechts een deel vormt van het rioolslib. De veranderde bijdrage van deze source van sediment is daarom lastig vast te stellen.

Voor de Westerschelde hebben verschillende herkomst- en balansstudies laten zien dat de belangrijkste bron voor fijn sediment marien is en dat de aanvoer vanuit de rivier hier een beperkte rol heeft gespeeld (zie het literatuuroverzicht in de nota “de rol van slib in het schelde-estuarium”, opgenomen in LTV V&T-rapport G-2 In de Zeeschelde heeft het slib overwegend een herkomst uit de rivier, maar uit een rapport over de verhouding marien/fluviatiel slib (KBIN, 1998) blijkt dat de bijdrage van marien slib in recente tijden toeneemt in de Zeeschelde. Dit komt overeen met de verwachte afname van de aanvoer van (fijn) sediment door de rivieren door de verandering van de historische (ongereguleerde, ongezuiverde) situatie naar de huidige (gereguleerde en gezuiverde) situatie. Naar de omvang van source voor (fijn) sediment van de rivieren wordt een studie uitgevoerd door het WLB.

5

Historische ontwikkeling Scheldebekken (tot ca. 1800)

5.1 KADER

Hoofdstuk 3 beschreef de ontwikkelingen van de waterstanden in het estuarium. De toename van het hoogwater, de afname van het laagwater en daarmee de toename van de getijslag speelt al vanaf het begin van de gedocumenteerde waarnemingen. De ontwikkelingen van de afgelopen eeuw zijn dus onderdeel van een ontwikkeling die al ten minste duizend jaar plaatsvindt. Ook de veranderingen in de sedimenthuishouding passen in een heel lange ontwikkeling. In de aanloop naar de beschrijving van de huidige sources en sinks voor sediment wordt in dit hoofdstuk de historische ontwikkeling beschouwd. Deze beknopte beschouwing van de veranderingen in waterstanden en sinks en sources van sediment is gebaseerd op verschillende meeromvattende studies en beschrijving, waaronder Coen (2008).

5.2 VAN RIVIER(TJES) TOT ESTUARIUM

De kennis van de Schelde uit de periode voordat geschreven bronnen beschikbaar kwamen is gebaseerd op geologische en archeologische bronnen. In de Holocene afzettingen uit het Scheldebekken is de toenemende invloed van de zee te herkennen, doordat sediment met een mariene herkomst wordt aangetroffen op sediment dat onder zoete omstandigheden is afgezet. De toenemende invloed van de zee was een gevolg van de snel stijgende zeespiegel. Van belang voor het begrip van sources en sinks van sediment is dat in de periode tot de Romeinse tijd in grote delen van het huidige Schelde-estuarium veenvorming heeft plaatsgevonden (Vos en van Heeringen, 1997). De vorming van het veen heeft het potentiële kombergingsvolume geheel gevuld. Waar veen aanwezig was, ontbrak de ruimte voor andere (fluviatiele of mariene) afzettingen.

De ruimte voor het indringen van de zee, in de periode van ongeveer 500 tot 1000 na Chr., is ontstaan doordat het veenpakket door menselijk handelen in omvang afnam of zelfs verdween. Deze afname was enerzijds het gevolg van direct afgraven en anderzijds het gevolg van landbouw op het veen, die gepaard ging met het draineren en verbranden van de toplaag. De sporen van de turfonginning (ook wel uitvening, moertering en vanwege het gebruik bij de raffinage van zout: selnering genoemd) zijn nog op verschillende plaatsen in en langs de Scheldeoevers terug te vinden. In figuur 5.1 is een voorbeeld getoond van resten van de winning, in de vorm van achtergebleven turfjes in langgerekte verdiepingen in het veen nabij Bath. Overigens is het uitvenen nog doorgegaan tot ten minste in de 18^e eeuw, toen stroomopwaarts langs de Schelde gebieden werden onteend.

Een van de gevolgen van het indringen van zee was het ontstaan van een verbinding tussen de zeearm Honte en de Schelde-rivier. Voordien was de Schelde verbonden met wat nu de Oosterschelde is. De verbinding tussen Honte en Schelde vond waarschijnlijk plaats tussen 1000 tot 1200. Deze verbinding werd

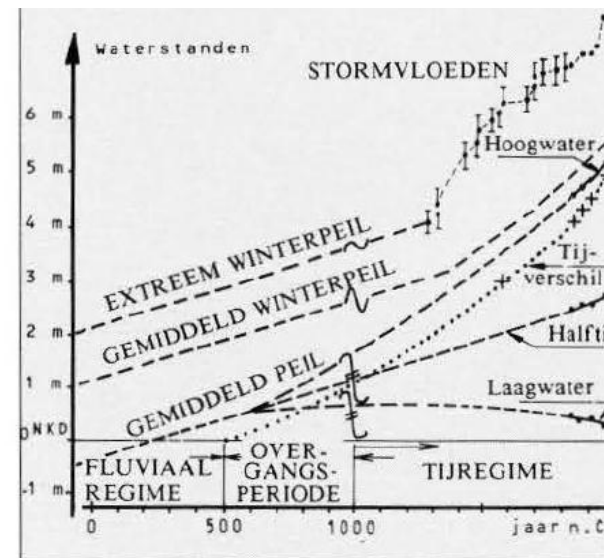
snel belangrijker dan de oorspronkelijke verbinding met de Oosterschelde. In de 14^e eeuw werd de Westerschelde de nieuwe scheepvaartroute naar Antwerpen. De omvang nam in periode daarna verder toe (Van der Spek, 1994).



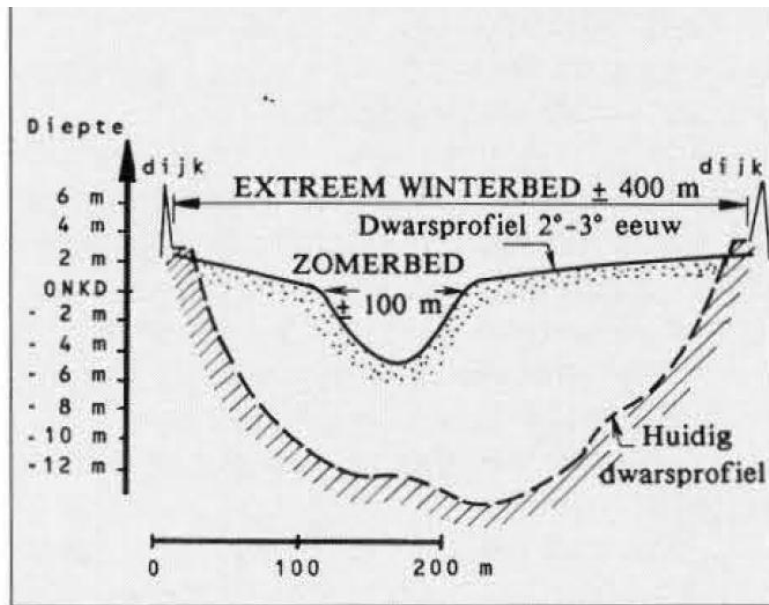
Figuur 5.1 Turfjes in het slik bij Bath.

Figuur 5.2 laat schetsmatig zien hoe bij Antwerpen de waterstanden veranderden als gevolg van de toenemende invloed van de zee en het getij. In eerste instantie, tot ongeveer 500 jaar na Chr., was nog geen sprake van invloed van de zee. Daarna volgde een overgangperiode, waarin de invloed van de zee toenam. Na de 13^e eeuw kan worden gesproken over stormvloedwaterstanden, blijkbaar kunnen deze dan via de Westerschelde tot in Antwerpen doordringen.

Het verschil in omvang tussen de situatie in de 2^e - 3^e eeuw en de recente omvang van de Schelde bij Antwerpen is schematisch weergegeven in figuur 5.3. In de volgende twee paragrafen zal worden ingegaan op de gevolgen die de veranderingen in de invloed van de zee en de waterbeweging en de veranderingen in de omvang van het stroomgebied hebben gehad op de sources en sinks in het Schelde estuarium.



Figuur 5.2 Reconstructie waterstanden en tijverschillen te Antwerpen (uit Coen, 1988).

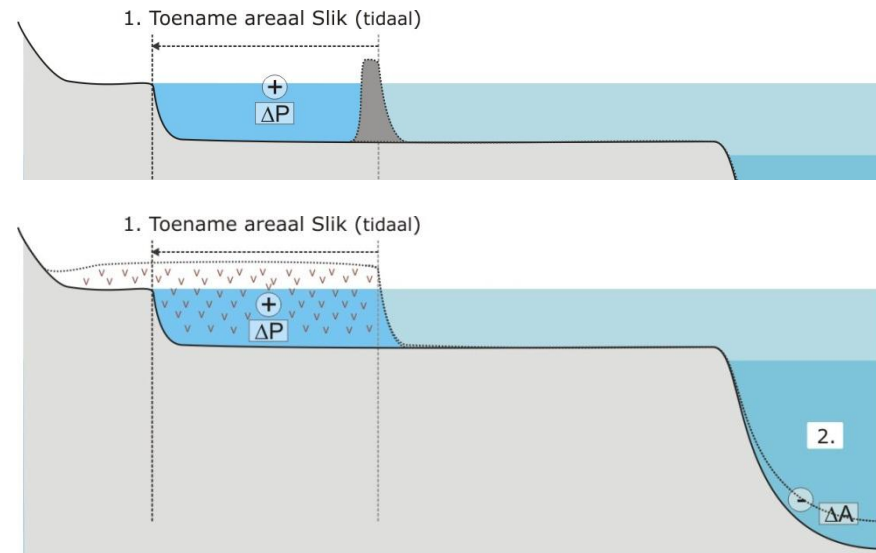


Figuur 5.3 Schematische weergave profielen (Coen, 1988).

5.3 TOENAME VAN HET KOMBERGINGSAREAAL

Het kombergingsareaal van het Schelde-estuarium nam toe met het ontstaan van de verbinding tussen Honte en Schelde en met het aantakken van de voormalige veengebieden. Figuur 5.4 geeft een schematische weergave van de toename van het areaal intergetijdegebied, zoals dat optrad bij het overstromen van verveende gebieden en bij het wederom overstromen van polders door stormvloeden of moedwillige inundaties. In beide gevallen is geen sprake van sediment dat beschikbaar komt in de intergetijdegebieden. Wel is sprake van een toename van het kombergingsvolume, waarbij een groter doorstroomoppervlakte hoort. De

geulen gaan dan dus optreden als een bron van sediment. Met een grotere geul verandert ook de voortplanting van het getij.



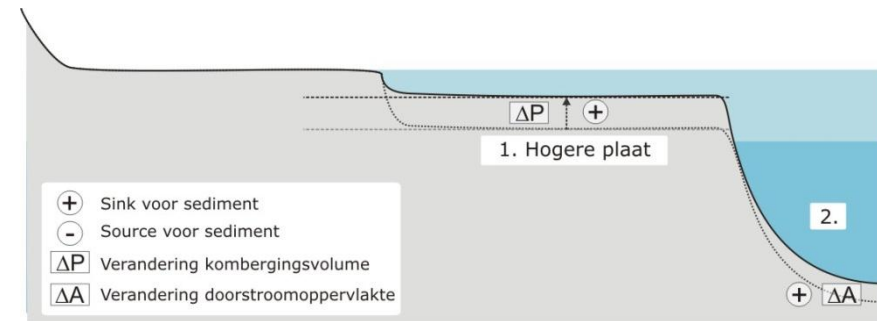
Figuur 5.4 Schematische weergave van de uitbreiding van het areaal slik door inundaties (boven) en verdwijnen van het veenpakket (onder), die leidt tot een toename van het kombergingsvolume en daarmee tot een toename van de doorstroomoppervlakte van de geul.

Ook omgekeerde ontwikkelingen vonden plaats, namelijk het ophogen van de slikken en platen (figuur 5.5) en de natuurlijke aanwas van schorren (figuur 5.6). Bij deze ontwikkelingen neemt het kombergingsvolume af, zoals is geïllustreerd in figuur 5.5 en figuur 5.6. Het gevolg is een afname van de benodigde doorstroomoppervlakte van de geul, zodat deze als sink voor sediment kan gaan

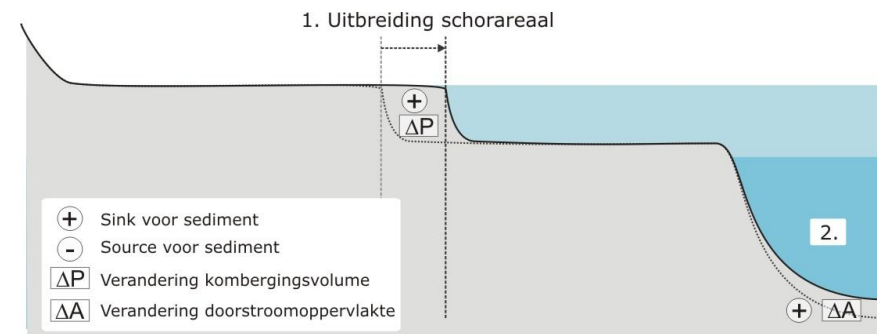
fungeren. Afdammingen van intergetijdegebieden, zoals deze in de 19^e en 20^e eeuw plaatsvonden (Kreekrak, Sloe, Braakman), hebben hetzelfde effect.

Vanaf de 12^e eeuw vond landaanwinning plaats in het Schelde-estuarium, waarbij voldoende hoog opgeslibd gebied werd bedijkt. Deze bedijkingen resulteerden in een afname van het areaal van het estuarium. Het kombergingsvolume nam niet noodzakelijk af door de bedijkingen, omdat deze gebieden veelal al zo hoog waren opgeslibd dat deze op schor niveau lagen en geen bijdragen meer leverden aan de komberging. Door storminvloeden overstroomden sommige van deze polders en breidde de invloed van het estuarium weer uit. Overstroomde polders leverden vaak wel een bijdrage aan het kombergingsvolume van het estuarium, omdat enerzijds het niveau van hoogwater in het estuarium gestegen was ten opzichte van het moment van inpolderen en anderzijds het maaiveld van de polder aan klink onderhevig was. Bij de toename van het kombergingsvolume hoort een toename van de dwarsdoorsnede van de geul en dus een rol als source van sediment.

In de 16^e en 17^e eeuw vonden op grote en kleinere schaal moedwillige inundaties van polders plaats voor de oorlogsvoering. In figuur 5.7 is een overzicht opgenomen van de verschillende inpolderingen en inundaties in de omgeving van Antwerpen.



Figuur 5.5 Schematische weergave van het effect van het ophogen van de platen, die leidt tot een afname van het kombergingsvolume en daarmee tot een afname van de doorstroomoppervlakte van de geul.



Figuur 5.6 Schematische weergave van de uitbreiding van het areaal schor, die leidt tot een afname van het kombergingsvolume en daarmee tot een afname van de doorstroomoppervlakte van de geul.

5.4 HERVERDELING SEDIMENT

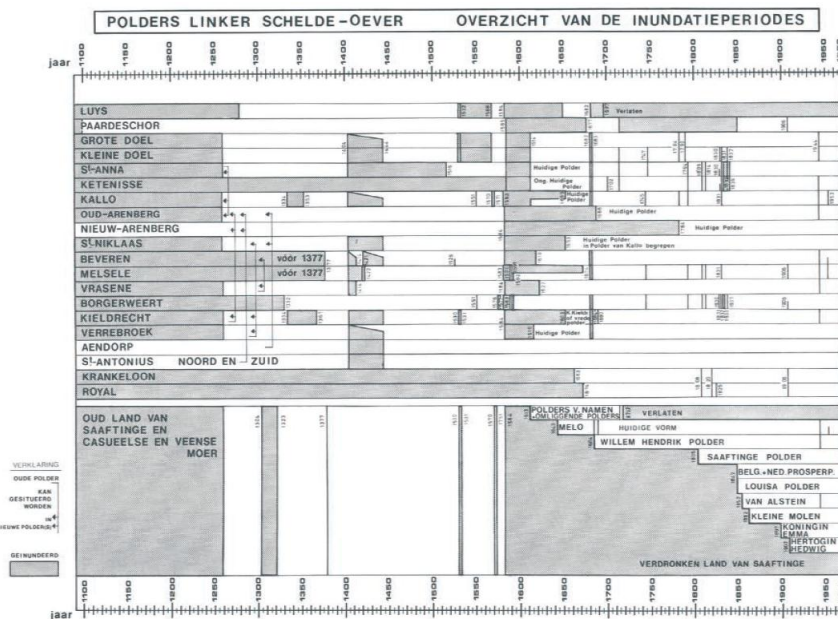
De geulen hebben een bron van sediment gevormd, vanwege de toename van het kombergingsvolume, zowel door de uitbreiding van het kombergingsareaal (figuur 5.4) als door de toename van het hoogwater (figuur 3.2), lokaal in combinatie met de afname van het laagwater (figuur 3.3). De slikken en schorren hebben gefungeerd als sinks voor het sediment. De rol als sink was uitgespeeld als gebieden bedijkt werden. Na (moedwillige) inundatie nam het kombergingsvolume wederom toe en kwam het gebied als sink beschikbaar. Getuigen van de herverdeling van sediment die heeft plaatsgevonden zijn de meters dikke sedimentpakketten die op (de restanten) van het veen worden aangetroffen in Nederland en Vlaanderen (van Strydonck & de Mulder, 2000; Vos & van Heeringen, 1997).

Een rekenvoorbeeld is nuttig om te illustreren hoeveel sediment ruwweg herverdeeld kan zijn sinds het ontstaan van de Westerschelde. Uitgangspunt voor de berekening is het ontbreken van een Honte van enige betekenis in het jaar 0. Het watervolume van de Westerschelde onder NAP – 2m bedroeg in de jaren '50 ruim $2 \times 10^9 \text{ m}^3$. Als het volledige volume aan water beschikbaar zou zijn gekomen voor sedimentatie, dan is dat voldoende voor een laag van 5 m dik over een gebied van 430 km², dat is anderhalf keer de huidige oppervlakte van de Westerschelde. Hoewel op deze berekening wel het een en ander aan te merken is (bijvoorbeeld omdat geen rekening is gehouden met de aanwezigheid van veen, de Honte mogelijk een aanvangsvolume had dat groter was dan nul, beter het volume aan eind van de 19^e eeuw genomen had moeten worden, etc.), is de ordegrrootte van de sedimentherverdeling wel duidelijk. Veel (zo niet al) van het sediment dat nu rond de Westerschelde in de polders wordt aangetroffen is waarschijnlijk vrijgekomen bij het ontstaan en de ontwikkeling van het Schelde – estuarium. Het lijkt waarschijnlijk dat dit ook opgaat voor de Zeeschelde, waarvan de omvang ook sterk is toegenomen bij de geleidelijke verandering van rivier naar estuarium (figuur 5.3).

5.5 STAPSGEWIJZE ONTWIKKELING

Bovenstaande ontwikkelingen verlopen in stappen en die stappen hebben in het gehele estuarium verschillende tijdslijnen gekend.

1. Initieel: Aantakken Honte en overstroming van ontveende gebieden, ontstaan kombergingsgebieden in ontveende gebieden.
2. Sedimentatie in de nieuwe intergetijdegebieden, erosie van de geul, toename getijslag en daarmee toename kombergingsvolume; Ook sedimentatie op platen en uitbreiden schorren en daarmee afname kombergingsvolume.
3. Bedijking van al hoge opgeslibde gebieden, met waarschijnlijk geen of beperkt effect op komberging.
Ondertussen doorgaande toename hoogwater.
4. Inundatie poldergebieden, die door hogere hoogwaterstanden, waarschijnlijk in samenhang met compactie van de polders, opnieuw beschikbaar zijn als kombergingsgebied.
5. Daarmee toename kombergingsvolume, grotere geul, sediment uit de geul en sedimentatie in de voormalige polders.
6. Sedimentatie in voormalige polders, gevolgd door nieuwe bedijking en daarmee en afname kombergingsvolume.



Figuur 5.7 Polders linker Scheldeoever, overzicht van de inundatieperiodes (Guns, 2008).

5.6 CONCLUSIES

Het beschikbaar komen van kombergingsvolume door uitvenen, overstromingen en intentionele inundaties, evenals de gestage toename van het niveau van hoogwater, hebben geleid tot een toename van de omvang van geulen, die hierdoor een bron van sediment vormden. Het sediment werd afgezet op de slikken en schorren, waardoor het kombergingsvolume afnam. Deze ontwikkelingen hebben geleid tot een grootschalige herverdeling van sediment in het Schelde-estuarium, van de geulen naar de inter- en supragetijdegebieden. Deze gebieden zijn gaandeweg voor een belangrijk deel ingepolderd.

6

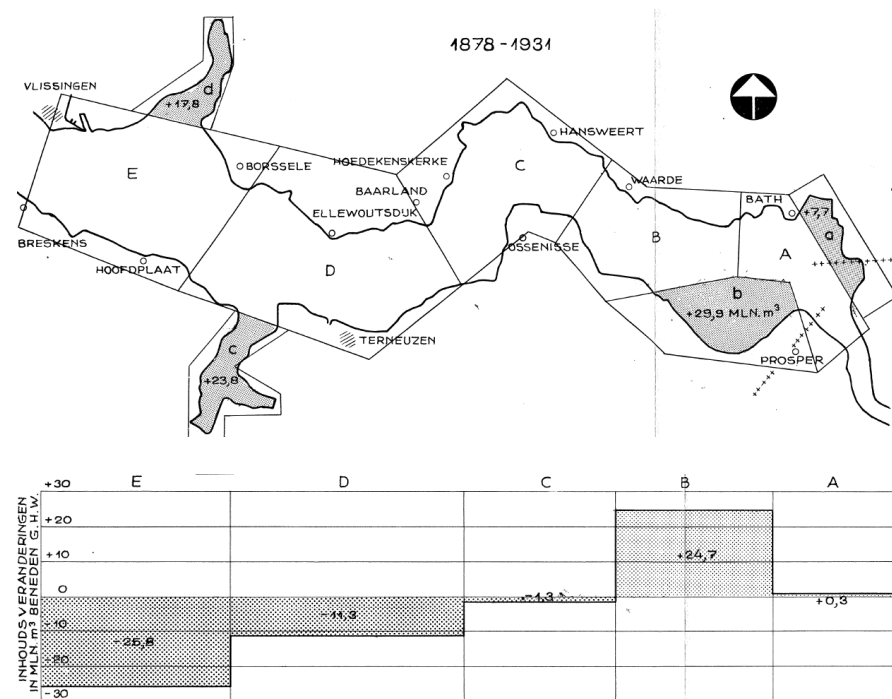
Het Schelde-estuarium van ca. 1800 – ca. 1950

6.1 AFBAKENING

In de periode van ruwweg 1800 tot c1950 zijn de buitencontouren van het Schelde-estuarium min of meer afgetekend, op de zijarmen Sloe en Braakman na. Inundaties treden niet meer op. De buitenbochten in de Westerschelde worden vastgelegd met bestortingen, in antwoord op de regelmatig optredende oevervallen. De ingrepen ten bate van de scheepvaart op Antwerpen beginnen in die periode structureel te worden. Bij Antwerpen worden in de 19^e eeuw de kaaien in verschillende stappen rechtgetrokken. In de Zeeschelde en de zijrivieren vinden verschillende rechtekkingen plaats. Het is, zögezegd, de periode van de 'mechanisering' van de Schelde. Het gevolg was een doorgaande 'vertrechtering'. De omvang van sinks in de vorm van de slikken en schorren nam af. De geulen bleven een belangrijke source van sediment.

6.2 SINKS IN DE ZIJARMEN, SOURCE IN DE GEUL

In de grafiek in figuur 6.1 die afkomstig is uit Bakker en de Looff (1977), is de verruiming van de stroomvoerende delen van de westelijke Westerschelde (tot en met wat tegenwoordig macrocel 4 is) in periode van 1878-1931.



Figuur 6.1 Sedimentatie en erosie in de Westerschelde (uit Bakker en de Loof, 1977). De sedimentatie in de zijarmen (a, b, c en d) staan in de kaart, de erosie en sedimentatie in de Westerschelde zelf (A, B, C, D, E) in de grafiek.

In gebied B in de oostelijke delen is sedimentatie opgetreden.. Deze lokale afname van het watervolume, en daarmee de waarschijnlijke afname van de

doorstroomoppervlakte, was mogelijk het gevolg van de lokaal sterke afname van het kombergingsvolume (sedimentatie en inpoldering ten zuiden van Saeftinghe en bij het Kreekrak).

De sedimentatie in de zijarmen Sloe, Braakman, Kreekrak e.a. betekent een afname van kombergingsvolume aldaar (zie figuur 5.5 en figuur 5.6 in het voorgaande hoofdstuk). De introductie en aanplant van het Engels slijkgras (*Spartina townsendii* var. *Anglica*) heeft deze sedimentatie na de jaren '20 mogelijk versneld, hoewel ook in de periode daarvoor al hoge sedimentatiesnelheden optraden. De lokale aanvoergeulen naar deze zijarmen, bijvoorbeeld het Vaarwater langs Hoofdplaat, zijn door de afname van het kombergingsvolume van de zijarmen in de decennia erna in omvang afgenomen. Voor het Vaarwater langs Hoofdplaat gaat deze ontwikkeling nog altijd door.

De omvang van de sedimentatie in de zijarmen was met in totaal $79,2 \times 10^6 \text{ m}^3$, oftewel jaarlijks gemiddeld $1,49 \times 10^6 \text{ m}^3$, groot in verhouding tot de veranderingen in de geulen, zoals zichtbaar is in tabel 6.1.

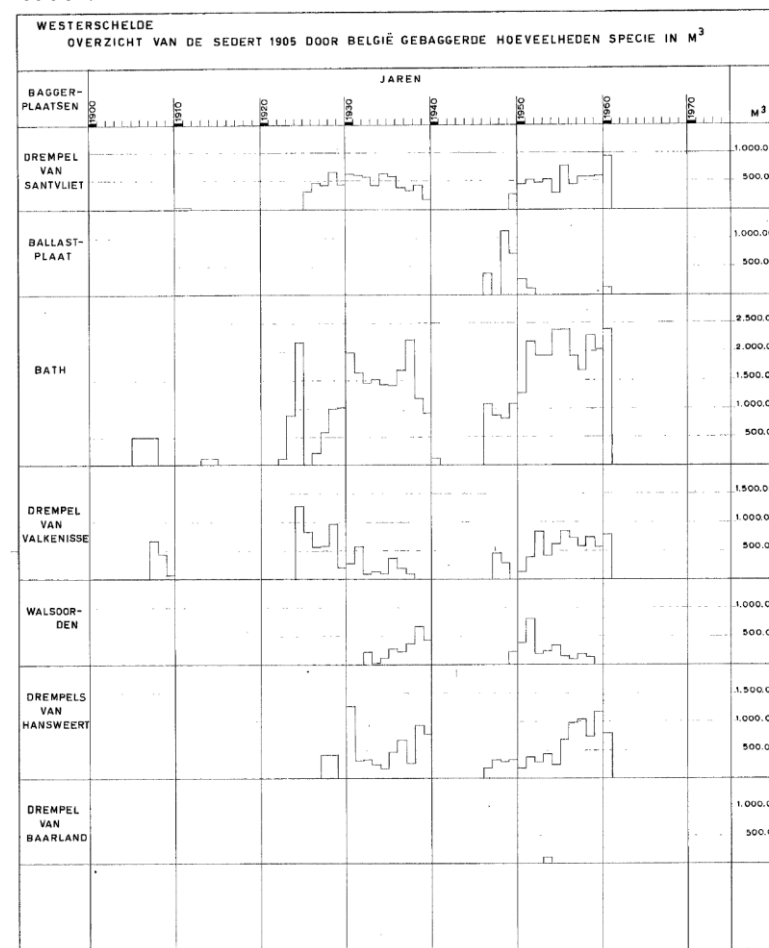
TOTALE AANZANDING RESP. VERDIEPING IN MLN m^3				
	1878 - 1931		1931 - 1952	
	MET GROTE SCHOR- GEBIEDEN $\text{a } \frac{1}{\text{m}} \text{ d}$	ZONDER GROTE SCHOR- GEBIEDEN $\text{a } \frac{1}{\text{m}} \text{ d}$	MET GROTE SCHOR- GEBIEDEN $\text{a } \frac{1}{\text{m}} \text{ d}$	ZONDER GROTE SCHOR- GEBIEDEN $\text{a } \frac{1}{\text{m}} \text{ d}$
TO TAAAL	+65,8	-13,4	+30,6	+5,0
GEM. PER JAAR	+1,24	-0,25	+1,46	+0,24

Tabel 6.1 Sedimentatie en erosie in de Westerschelde (uit Bakker en de Loof, 1977)

6.3 INGEPEN IN DE VAARWEG

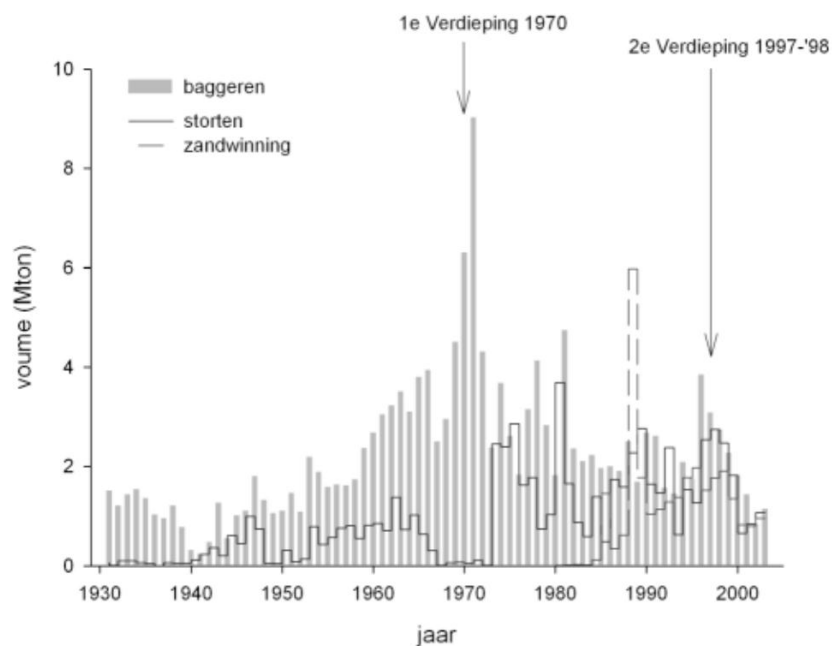
De grafiek in figuur 6.2 laat voor de Westerschelde, en figuur 6.3 voor de Beneden Zeeschelde, gedocumenteerde baggervolumes zien. Duidelijk is dat al

werd gebaggerd in het begin van de 20^e eeuw om de vaargeul op diepte te houden.



Figuur 6.2 Baggervolumes Westerschelde in de periode van 1900 tot 1960 (Groot, 1960).

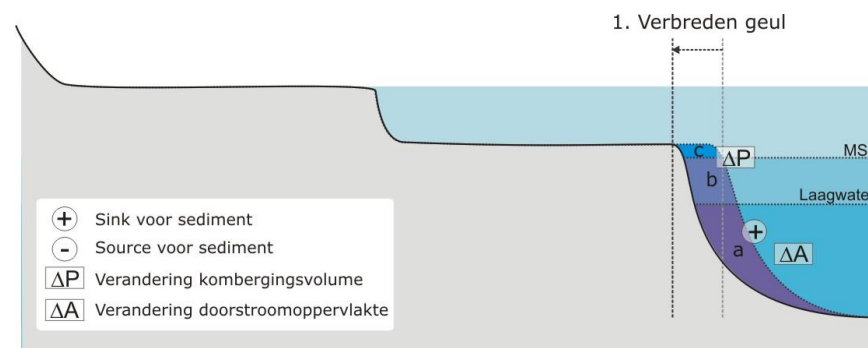
In de Zeeschelde begon het gemechaniseerde baggeren rond ca. 1850. Gedocumenteerde bagger(volume)opgaven van de Beneden-Zeeschelde zijn beschikbaar vanaf 1867 (Baggerstatistiek aMT). Zeker is dat zowel in de Beneden-Zeeschelde ook als in andere delen van het stroomgebied werd gebaggerd, maar van de andere delen zijn geen opgaven beschikbaar. Verschillende archeologische vondsten uit de bagger getuigen van het baggeren in verschillende delen van het stroomgebied.



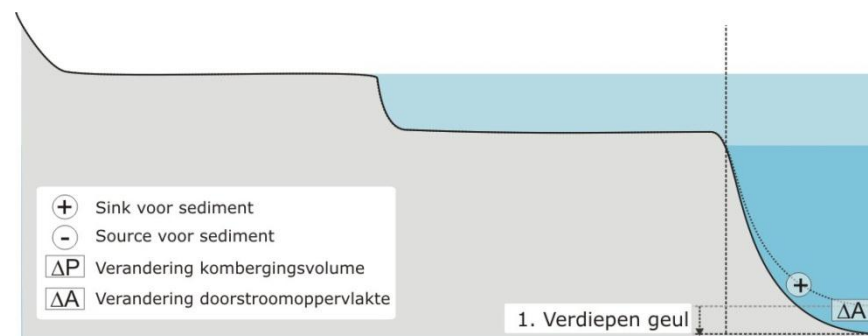
Figuur 6.3 Baggervolumes in de Beneden Zeeschelde (uit Van Braeckel e.a., 2006).

Het gevolg van baggeren op de doorstroomoppervlakte is weergegeven in figuur 6.4 voor het verbreden van de vaargeul en in figuur 6.5 voor het verdiepen van

de vaargeul. Verdiepen, zonder daarbij eventuele bijkomende effecten op het getij bij te betrekken, heeft alleen een effect op de doorstroomoppervlakte. Verbreden heeft zowel een effect op de doorstroomoppervlakte van de geul als op het kombergingsvolume.



Figuur 6.4 Schematische weergave van het effect van het verbreden van de geul met de bijbehorende toename van het kombergingsvolume ($b + c$) en de toename van de doorstroomoppervlakte van de geul ($a + b$).



Figuur 6.5 Schematische weergave van het effect van het verdiepen van de geul met de bijbehorende toename van de doorstroomoppervlakte van de geul.

Met verdiepen (zonder bijkomende veranderingen in het getij of de komberging op de slikken) vormt de geul een sink voor sediment. Met verruimen vormt de geul ook een sink, maar de omvang hiervan is kleiner dan bij het verdiepen. Het gebaggerde sediment werd ten dele teruggestort in het estuarium. Welk deel is onttrokken en welke deel is teruggestort is voor de historische werken niet gedocumenteerd. Terugstorten gebeurde op een andere locatie, zodat in ieder geval lokaal sprake was van verdieping dan wel verruiming.

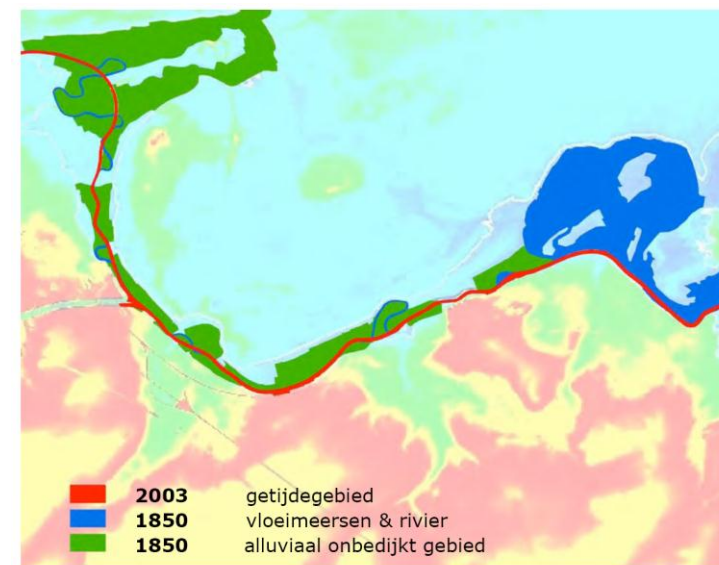
6.4 RECHTTREKKEN EN VASTLEGGEN

Rivienormalisatie

In de periode vanaf 1800 hebben op verschillende plekken langs het Schelde-estuarium inpolderingen plaatsgevonden, bijvoorbeeld gedocumenteerd in de Kraker (2002) en van der Spek (1994). In de Boven-Zeeschelde en de zijrivieren hebben in de periode voor 1900 ook verscheidene rivienormalisaties (rechttrekkingen) plaatsgevonden, waarbij meanders van de rivier zijn afgesneden. Ook zijn in deze periode veel gebieden van de rivier afgesneden die in het verleden konden overstroomd. In deze gebieden kon sediment worden afgezet, zodat ze als sink dienden. Een deel van deze gebieden was oorspronkelijk onbedijkt, een ander deel bestond uit gebieden die gecontroleerd onder water werd gezet (vloeimeersen). Een voorbeeld is getoond in figuur 6.6. Deze gebieden speelden geen rol voor de komberging van het getij, omdat deze gebieden geen onderdeel van het litoraal vormden. De bedijkingen en normalisaties hebben geleid tot een kortere rivier, met een veel kleinere stroombergende breedte. De rol die de oorspronkelijke overstromingsgebieden als sinks voor sediment speelden is weggefallen. In samenhang met de verschillende afdammingen en reguleringswerken in de rivier (figuur 4.1), is het stromingsregime in deze delen van het Schelde-estuarium zeer sterk gewijzigd

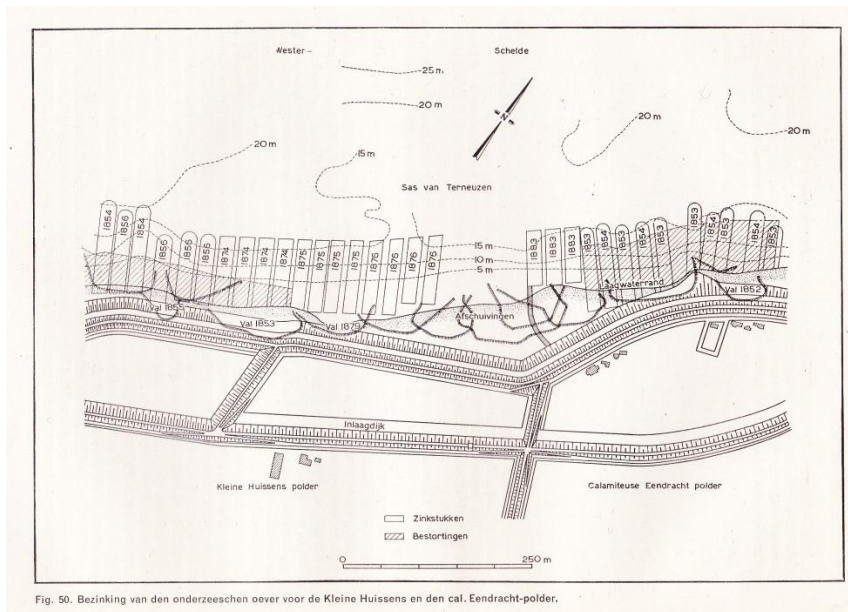
Bestorting

In de Westerschelde liggen op verschillende plekken al van oudsher kustverdedigingswerken, zie hiervoor historische kaarten van bijvoorbeeld Vlissingen. Deze kustverdedigingswerken bestaan uit dammen van verschillende vormen en origine. Nollen zijn in principe restanten van oude dijken van ondergelopen polders, die nu als strekdam worden gebruikt. Strekdammen zijn specifiek aangelegd om de stroom uit de kant te houden. Havendammen zijn de dammen die een haveningang afschermen. Overigens hebben sommige strekdammen de naam nol gekregen, bijvoorbeeld de Noordnol bij Borssele en de nol bij Knuitershoek. Het grootste deel van deze kustverdedigingswerken ligt onzichtbaar onder de waterlijn, in de vorm van zinkstukken met bestorting.



Figuur 6.6 Rechttrekkingen en bedijkingen in de Boven-Zeeschelde, stroomafwaarts van Gent (in blauw de Kalkense Meersen), uit Van Braeckel e.a., 2006.

In de 19^e en 20^e eeuw is het uitvoeren van zinkwerk met bestortingen structureel geworden, om locaties die werden getroffen door afschuivingen, oevervallen en dijkvallen te beschermen. In figuur 6.7 is een voorbeeld opgenomen van een segment van de zuidoever, ten oosten van Terneuzen, waarin zowel de opgetreden afschuivingen, als de aangebrachte bestortingen zijn te zien.



Figuur 6.7 Overzicht van oever- en dijkvallen en de uitgevoerde bezinkingen ten oosten van Terneuzen (Huiteima, 1947)

Het aanbrengen van het zinkwerk met bestorting is een effectieve manier om de erosie tegen te gaan, maar heeft wel als nadeel dat het lokale verdieping (ontgronding) in de hand werkt. De ontgronding treedt zowel in het verlengde als aan de teen van de bestorting op. Om de negatieve gevolgen van die verdieping tegen te gaan werden in veel gevallen de bestortingen verder

uitgebreid². Het aanbrengen van de bestortingen leverde na verloop van tijd uitgebreid bestorte delen op, met de diepste delen van de geul ervoor. Op veel plekken langs de Westerschelde heeft dit 'ophangpunten' voor de geul opgeleverd.

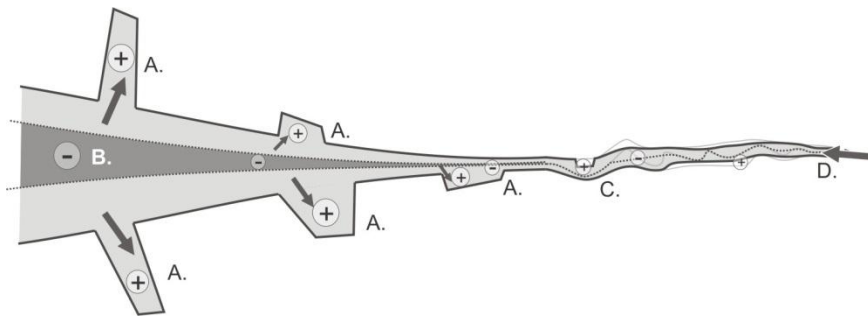
In termen van sinks en sources betekent het aanbrengen en vasthouden van de bestortingen dat de herverdeling, door erosie van de buitenbocht en sedimentatie aan de binnenbocht, op die locaties niet meer kan plaatsvinden. Het herverdelingsmechanisme van sediment door het optreden van oevervallen (feitelijk bresgroei, zie van den Berg e.a., 2002 voor een beschrijving van de processen) kan op deze plekken niet meer optreden. Dat is een belangrijke systeemgreep want oevervallen zijn een (snel) verplaatsingsmechanisme, waarmee volumes met een ordegrootte van miljoenen m³ gemoeid kunnen zijn (Huiteima, 1947; van den Berg e.a., 1996). In de huidige situatie kan dit alleen nog langs (de onbeschermd) plaatranden optreden.

6.5 CONCLUSIES

De ontwikkelingen in de periode van 1800-1950 zijn samengevat in figuur 6.8, waarvan hieronder de verschillende onderdelen worden toegelicht.

A. Sedimentatie in de zijarmen en aangrenzende slikken en schorren van de Westerschelde. De omvang van deze sinks nam af, doordat verdere inpolderingen plaatsvonden. Het kombergingsvolume van zijarmen en slikken en schorren nam ook af.

² De kosten van de bestortingen waren dermate hoog dat al in 1865 werd gezocht naar alternatieven (zie 'Middel van Stroomafleiding tot ontzet der aangevallen oevers in Zeeland', door A. Magelse), hetgeen een heftige discussie onder waterstaters opleverde (opgenomen in het Verslag aan den Koning over de Openbare Werken in het jaar 1865).



Figuur 6.8 Schematische weergave van de bronnen (-: 'sources') en putten (+ 'sinks') in het Schelde-estuarium, in de periode tot ongeveer 1960 waarbij het merendeel van de zijarmen nog actief waren.

B. Uitrusten van de geulen in de Westerschelde, waardoor deze een bron van sediment vormden. Deze toename van de omvang van de geulen vond plaats ondanks de afname van de kombergingsvolumes in de zijarmen. Waarschijnlijk nam de doorstroomoppervlakte toe vanwege de toename van de hoogwaterstanden en de afname van laagwaterstanden (figuur 3.2 en figuur 3.3).

C. Afnemende sedimentatie in de slikken, schorren en overstromingsgebieden (vloeivelden e.d.) van de Zeeschelde en de zijrivieren. Omdat de omvang van de overstromingsgebieden sterk afnam door bedijkingen nam de omvang van deze sink snel af. Op de komberging was de invloed waarschijnlijk gering. De geul verruimde ondertussen. Dat is nog niet sluitend verklaard, maar waarschijnlijk gebeurde het onder invloed van de toename van het niveau hoogwater. Hierdoor vormde de geul een bron van sediment.

D. Met regulering van de wateraanvoer via de rivieren veranderde de aanvoer van (fijn)sediment vanuit het achterland.

7

Het Schelde-estuarium de afgelopen 60 jaar

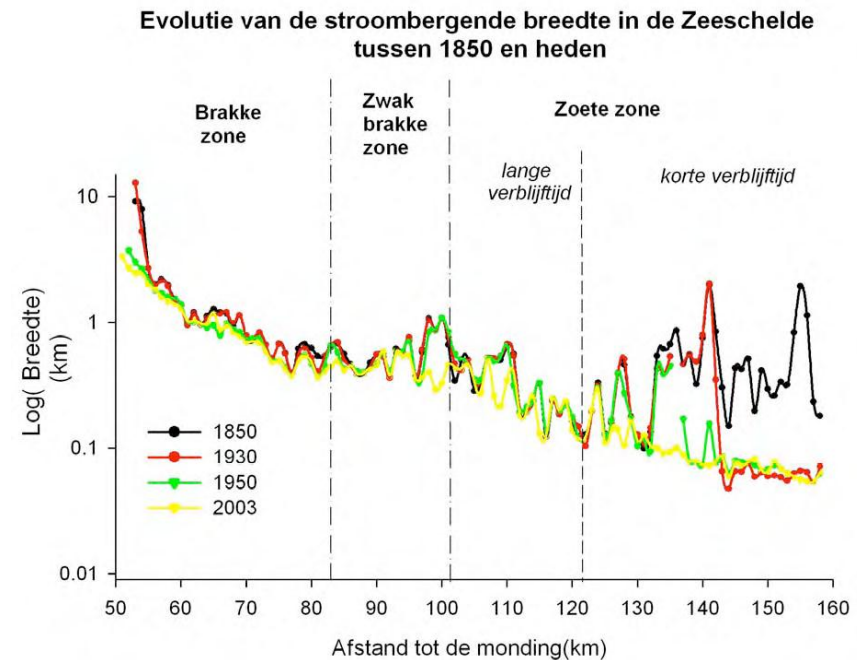
7.1 WAAR GAAT HET IN DIT HOOFDSTUK OM?

Bij de bespreking van het estuarium in de laatste 60 jaar gaat de nadruk liggen op de morfologische veranderingen in combinatie met de veranderingen in het getij. Hoofdstuk 3 leerde dat ook in de afgelopen 60 jaar sprake was van een doorgaande toename van de hoogwaterstanden, in de Westerschelde en de Beneden-Zeeschelde, naast een afname van het niveau van laagwater in de meer stroomopwaartse delen. Met de toename van het niveau van hoogwater en de afname van het niveau van laagwater is het kombergingsvolume toegenomen. Zandwinning wordt in dit hoofdstuk gekenmerkt als een belangrijke sink. Verder wordt ingegaan op de herverdeling van sediment door baggeren en storten.

7.2 GEOMETRIE VAN DE BENEDEN ZEESCHELDE

De buitencontour van de Zeeschelde is in de voorgaande periode en vooral in de 19^e eeuw grotendeels vastgelegd. Daarmee lag ook het kombergingsareaal grotendeels vast. Dit is onder andere zichtbaar in de grafiek van de

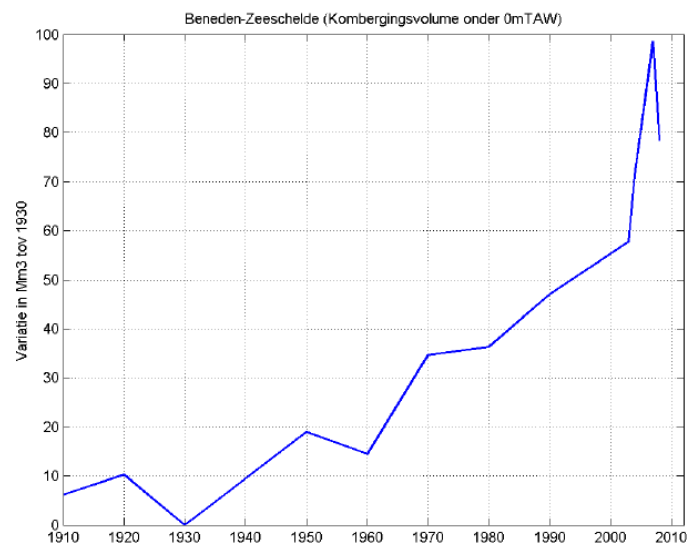
stroombergende breedte in de Zeeschelde in figuur 7.1. De Beneden-Zeeschelde, in deze grafiek deel van de brakke en de zwak brakke zone (van 50 km tot ongeveer 90 km), kent vrijwel geen verschil in breedte tussen 1950 en 2003. Wel is lokaal het areaal nog veranderd door de aanleg van sluisingen en havenbekkens, waaronder recentelijk het Deurganckdok.



Figuur 7.1 Evolutie van de stroombergende breedte in de Zeeschelde tussen 1850 en heden (uit Van Braeckel e.a., 2006)

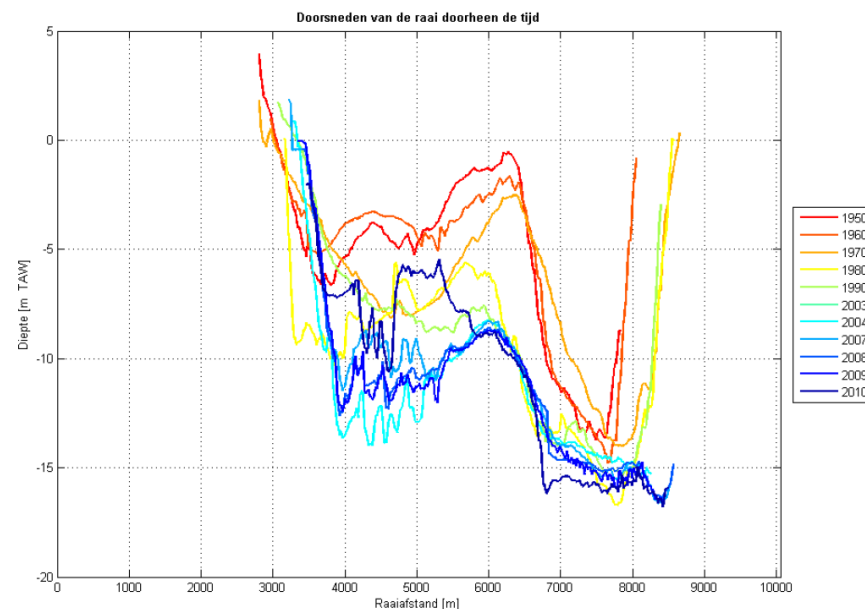
In het LTV V&T-rapport K-19 (Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013) is een analyse gepresenteerd van de ontwikkeling van de bodemligging in de Zeeschelde, waaruit een aantal ontwikkelingen hier worden toegelicht. In figuur

7.2 is te zien dat het watervolume in de geulen van de Beneden-Zeeschelde sterk is toegenomen in de 20^e eeuw. Het watervolume van de geulen is bepaald onder het niveau van 0 m TAW en dat komt overeen met NAP -2,33 m. Het niveau van 0 m TAW is daarmee vrijwel gelijk aan het niveau van NAP - 2 m dat in de Westerschelde als bovengrens voor de geulen wordt gehanteerd. De sterkste toename heeft plaatsgevonden in de periode 1960-1970. Het kombergingsvolume is overigens niet alleen maar toegenomen. De oorsprong van de fluctuaties in de grafiek in figuur 7.2 is niet bekend, dit kunnen werkelijk opgetreden veranderingen zijn, of het gevolg zijn van problemen met de gegevens. De fluctuaties zijn weliswaar groot (maximaal $20 \times 10^6 \text{ m}^3$), maar ze veranderen het beeld van een toename van kombergingsvolume niet, omdat deze toename 5 keer zo groot is.



Figuur 7.2 Ontwikkeling waterbergend volume onder 0mTAW in de Beneden-Zeeschelde in Mm^3 t.o.v. 1930 (LTV V&T-rapport K-19).

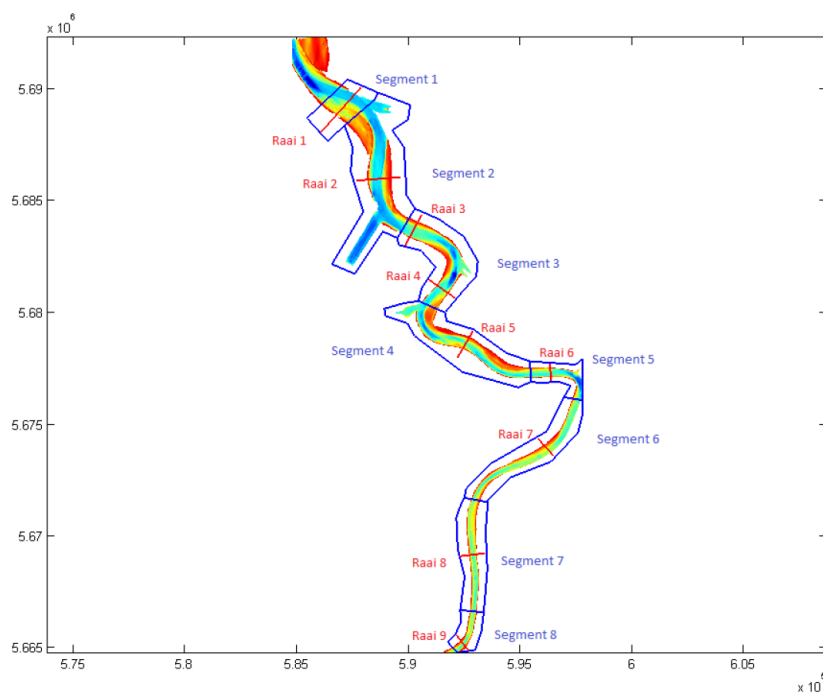
In de dwarsdoorsneden van de geul in figuur 7.3 is zichtbaar dat de toename van het watervolume bestaat uit het toenemen van zowel de breedte als de diepte van de geul.



Figuur 7.3 Variatie in bodemligging over raai 1 in de Zeeschelde (van linker- naar rechtoever, locatie van de raai in figuur 7.4) (uit: LTV V&T-rapport K-19).

Ook in de Boven-Zeeschelde is het watervolume (onder TAW 0 m) na 1960 toegenomen met bijna $9 \times 10^6 \text{ m}^3$. Vóór 1960 lijkt een beperkte afname van het watervolume te hebben plaatsgevonden. De toename van het watervolume in de Boven-Zeeschelde is in absolute zin veel kleiner dan de toename in de Beneden-Zeeschelde die bijna $100 \times 10^6 \text{ m}^3$ is. Omdat de Boven-Zeeschelde veel smaller is en het ruimtebeslag vele malen kleiner is dan van de Beneden-Zeeschelde, is,

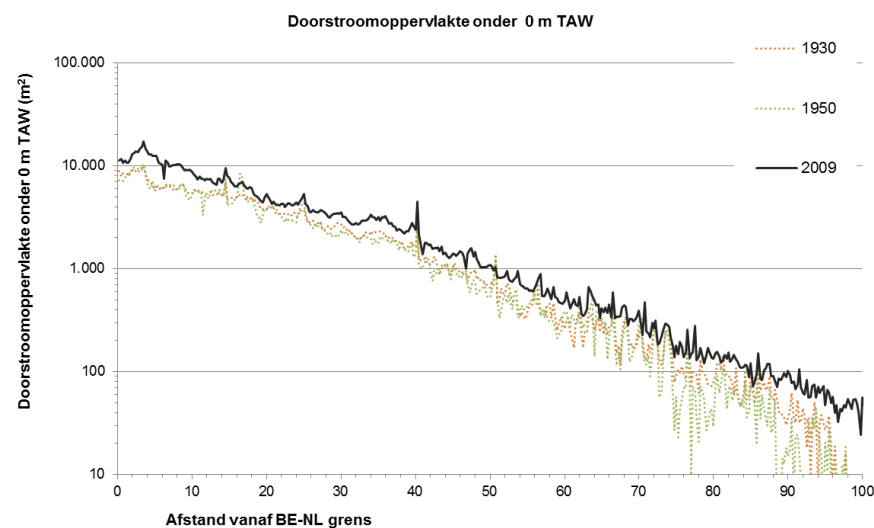
ondanks het kleine volume, toch sprake van een duidelijke verandering. Dit geldt ook voor de kleine toename van het watervolume in de Rupel (minder dan $2 \times 10^6 \text{ m}^3$) en de afname van het watervolume van de Durme van (ongeveer $0,5 \times 10^6 \text{ m}^3$). De geulen in de Zeeschelde en de Rupel hebben dus als source van sediment gediend, de Durme heeft als een (kleine) sink gediend.



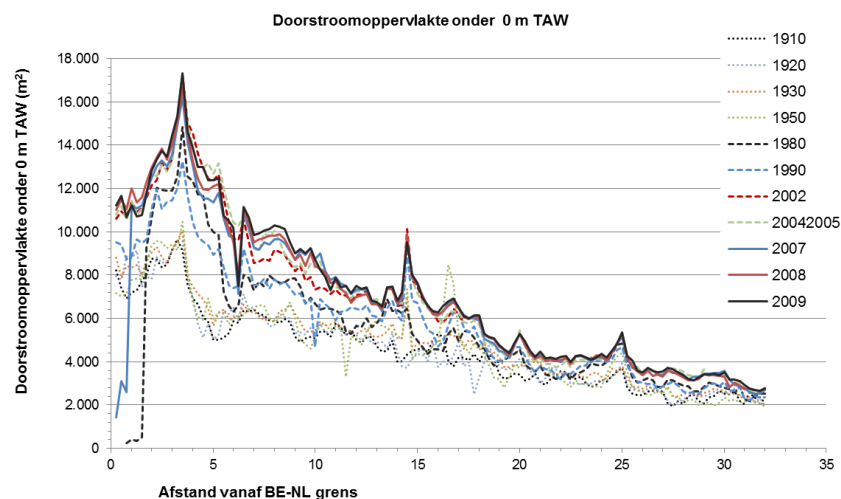
Figuur 7.4 Overzicht van geanalyseerde segmenten en raaien in de Beneden-Zeeschelde (uit: LTV V&T-rapport K-19).

De toename van het watervolume heeft zich gemanifesteerd in een toename van de doorstroomoppervlakte van de gehele Zeeschelde, zoals zichtbaar is in figuur

7.5. De grote veranderingen hebben zich voorgedaan tussen 1950 en 2009. Door de logaritmische schaal in figuur 7.5 is zichtbaar dat de toename inderdaad over de volle lengte van het estuarium waarneembaar is. De absolute en relatieve omvang van de veranderingen van de doorstroomoppervlaktes zijn het grootst in de Beneden-Zeeschelde. In figuur 7.6 is zichtbaar dat de omvang in de meest stroomafwaartse raaien (bij de grens met de Westerschelde) van om en na bij de 8.000 m^2 is toegenomen tot om en na bij de 12.000 m^2 , een toename met ongeveer 50%.

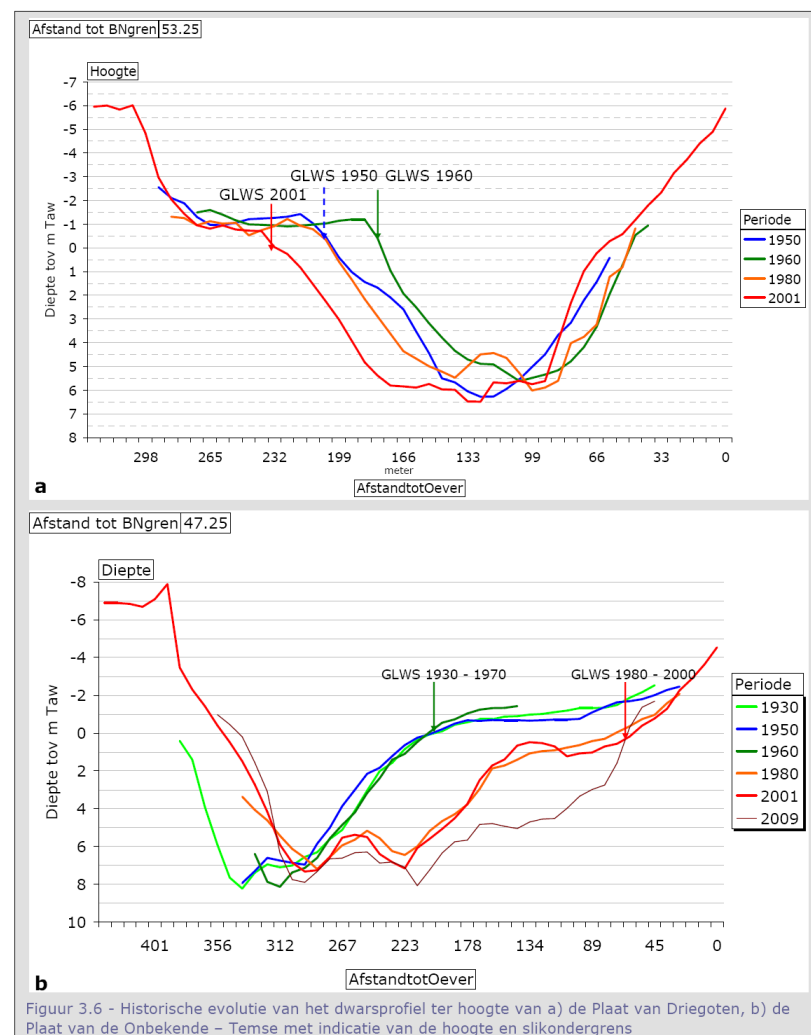


Figuur 7.5 Doorstroomoppervlakte onder 0 m TAW in de Zeeschelde (Consortium T2009, concept 2013, op basis van gegevens van INBO) – let op de logaritmische schaal.



Figuur 7.6 Doorstroomoppervlakte onder 0 m TAW in de Beneden-Zeeschelde (Consortium T2009, concept 2013).

Het beperkte areaal slikken in de Beneden-Zeeschelde lijkt geen uitgesproken ontwikkeling van de hoogte te vertonen. Dit kan bijvoorbeeld worden afgelezen uit de profielen van de slikken in figuur 7.7. Uitspraken over de ontwikkeling van het sedimentvolume dat wordt geborgen in de slikken en schorren van de Zeeschelde worden beperkt door de schaarste van de gegevens over de hoogte. Op basis van de beschikbare informatie lijkt het waarschijnlijk dat de slikken en de schorren in de Zeeschelde niet als een belangrijke sink voor sediment hebben gefungeerd.



Figuur 7.7 Dwarsdoorsneden uit Van Braeckel (2012).

7.3 GEOMETRIE VAN DE WESTERSCHELDE

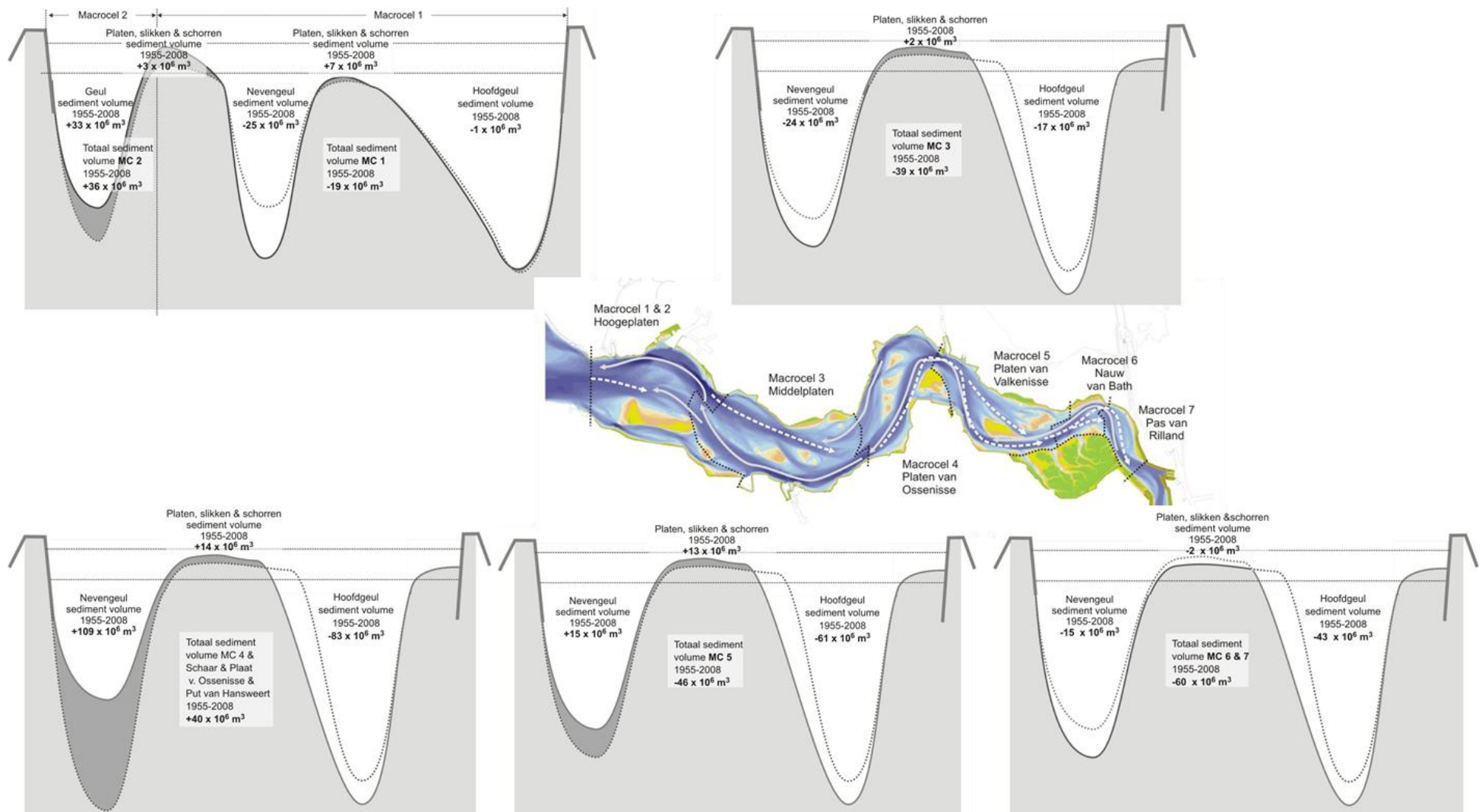
Langs de Westerschelde zijn tot in de jaren '70 van de 20e eeuw zijarmen en schorgebieden afgedamd (als laatsten een deel van de Braakman en de Schorren bij Ossendrecht) en ingrijpend heringericht (zoals Sloe, Braakman). De Westerschelde is daarmee in areaal afgenomen, maar een deel van het kombergingsvolume is behouden in de havenbekkens. Van de aangrenzende sedimentatiegebieden is alleen het Land van Saeftinghe nog aanwezig als sink voor sediment. De omvang van de sink in het Land van Saeftinghe staat nog ter discussie, zoals is weergegeven in het LTV V&T-rapport G-2. Daar is uitgegaan van een jaarlijkse sedimentatie van $0,3 \times 10^6 \text{ m}^3$, wat iets minder is dan het historisch waargenomen jaarlijkse sedimentatie volume (zie het vorige hoofdstuk).

Het watervolume in de Westerschelde is toegenomen, waarbij vrijwel iedere macrocel een andere ontwikkeling vertoont. Figuur 7.8 toont een overzicht van de verschillen per macrocel, waarbij de, vergelijkbare, ontwikkelingen van de macrocellen 6 en 7 zijn gecombineerd. In alle macrocellen is de omvang van de hoofdgeul toegenomen en heeft deze als een source voor sediment gediend. Het beeld voor de nevengeulen verschilt per macrocel, met erosie in van de nevengeul en in macrocellen 1, 3, 6 en 7 en sedimentatie in de nevengeulen van macrocel 4 en 5. Macrocel 2, met de Geul langs Hoofdplaat, is een belangrijke sink voor sediment. De gebieden boven het niveau van laagwater, de platen, slikken en schorren, zijn overal het algemeen sedimentatiegebieden, met uitzondering van macrocellen 6 en 7. In het volgende hoofdstuk zal nader worden ingegaan op de rol die platen en slikken en kortsluitgeulen door de plaatcomplexen spelen als sink. Deze rol blijkt minder eensluidend dan figuur 7.8 suggereert. Uit de figuur kan worden opgemaakt dat de omvang van veranderingen op de platen, slikken en schorren relatief klein is ten opzichte van de veranderingen van de geulen.

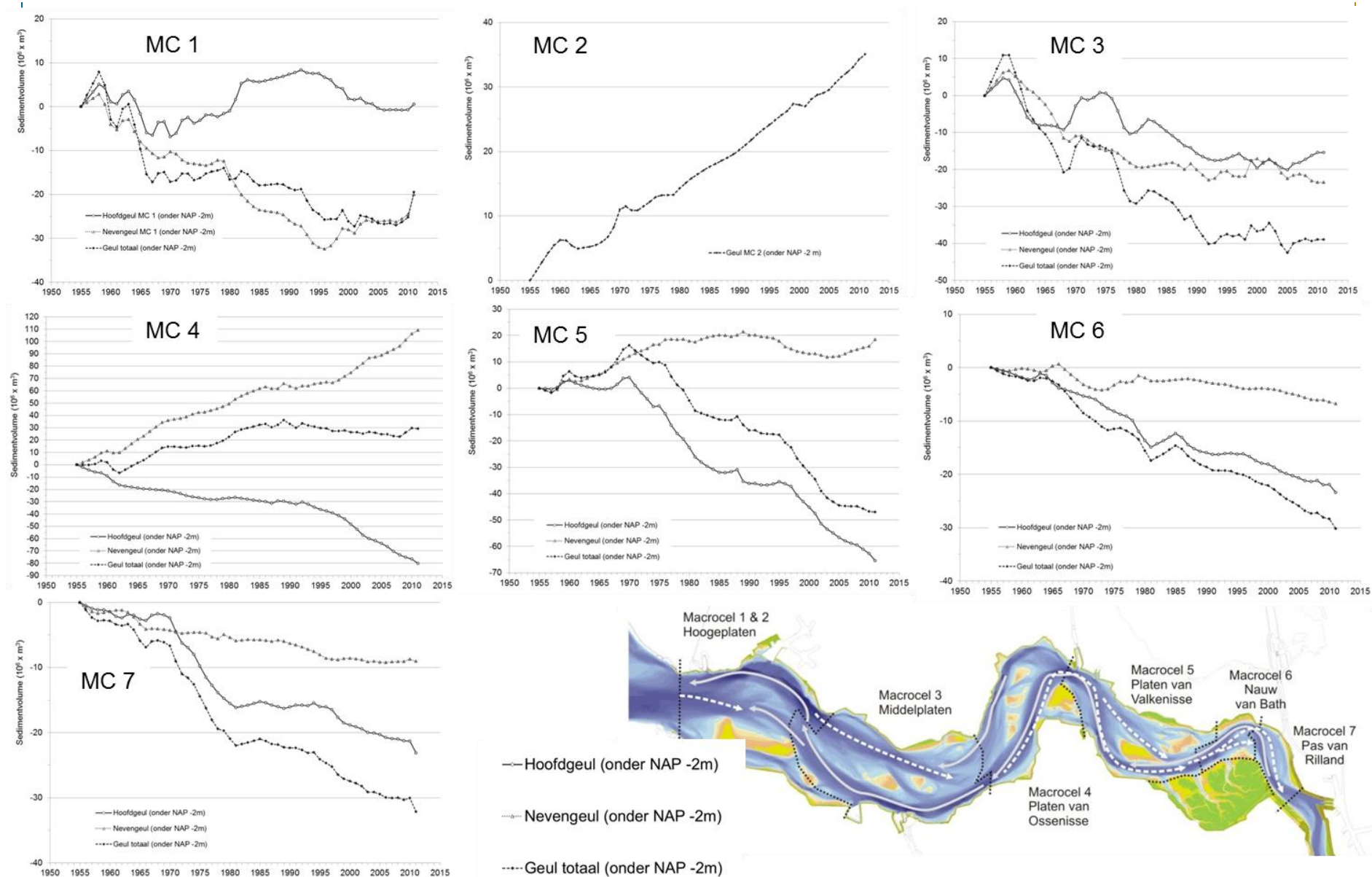
In aanvulling op de schematische weergave in figuur 7.8 zijn in figuur 7.9 ook de grafieken met de ontwikkelingen van de sedimentvolumes van de hoofd- en nevengeulen (onder NAP -2 m) opgenomen. Deze grafieken laten zien dat niet alle veranderingen per macrocel in de loop van de getoonde periode op dezelfde wijze en met dezelfde snelheid verlopen. Uitzondering is mesocel 2, die een vrijwel constante sedimentatie vertoont.

De grootste veranderingen in de volumes van de hoofd- en de nevengeul treden op in macrocel 4, waar een wisseling van de rol van de hoofd- en de nevengeul plaatsvond. Deze grote verandering betreft een herverdeling van het sediment binnen de macrocel. Het totale sedimentvolume in de macrocel is ten opzichte van deze herverdeling relatief beperkt toegenomen.

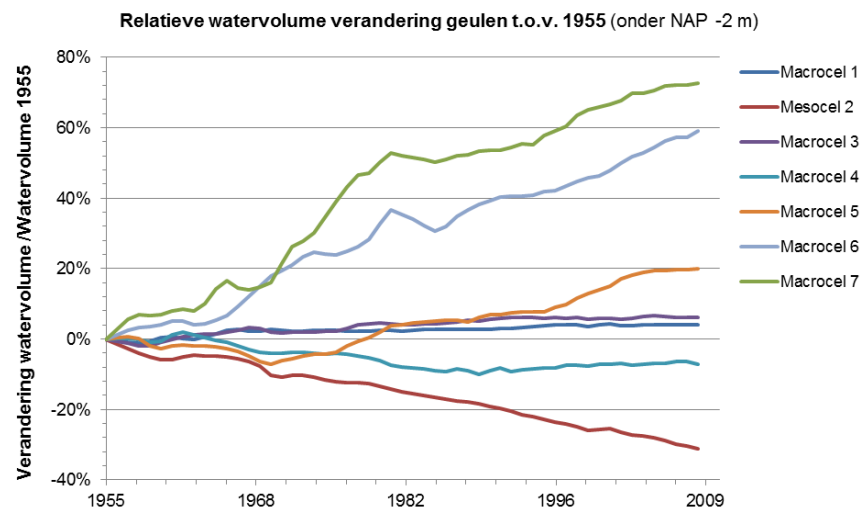
De grote afnames van de sedimentvolumes hebben plaatsgevonden in de oostelijke helft van de Westerschelde, in de macrocellen 5, 6 en 7. In macrocellen 1 en 3 heeft een beperkte afname van de sedimentvolumes plaatsgevonden. In figuur 7.9 wordt de absolute ontwikkeling van de sedimentvolumes getoond. Omdat de oppervlakten en watervolumes van de westelijke macrocellen beduidend groter zijn dan die van oostelijke macrocellen, is de impact van eenzelfde volumeverandering groter in het oosten dan in het westen. In figuur 7.10 is daarom ook de relatieve verandering van de sedimentvolumes van de geulen getoond, ten opzichte van het watervolume in 1955. Duidelijk is dat de relatieve veranderingen in de oostelijke macrocellen 6 en 7 zeer groot zijn.



Figuur 7.8 Overzicht van de verschillen in sedimentvolumes per macrocel van de Westerschelde, voor de kenmerkende onderdelen.



Figuur 7.9 Overzicht van de ontwikkelingen van de geulen (onder NAP - 2 m), per macrocel in de Westerschelde.



Figuur 7.10 Relatieve verandering van het watervolume van de geulen (onder NAP -2 m, op basis van de Zandbalans Rijkswaterstaat).

De morfologische veranderingen hebben er toe geleid dat de doorstroomoppervlakte van de Westerschelde vooral in het oostelijke deel is toegenomen.

7.4 ONTREKKINGEN VAN SEDIMENT: EEN ANTROPOGENE SINK

In het voorgaande hoofdstuk is aannemelijk gemaakt dat het baggeren van sediment in de Zeeschelde tenminste vanaf het einde van de 19^e eeuw op steeds uitgebreidere schaal plaats vond. In de Westerschelde werd in de het begin van 20^e eeuw begonnen met baggeren (figuur 6.2). Of in en voor de periode 1900-1960

al sediment onttrokken is aan de Westerschelde en de Zeeschelde is niet gedocumenteerd.

Na 1955 is er zeker jaarlijks sediment aan de Westerschelde en de Beneden – Zeeschelde onttrokken. Vaak wordt hierbij gerefereerd aan zandwinning, maar omdat het niet alle gevallen noodzakelijkerwijs zand is, wordt hier gesproken over sediment.

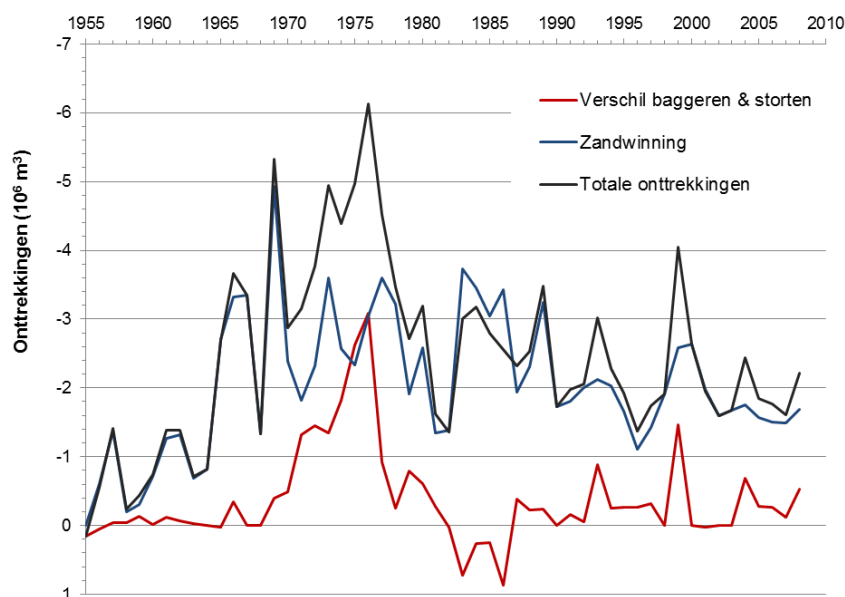
Figuur 7.11 toont de onttrekkingen uit de Beneden-Zeeschelde in periode van 1955 tot 2009. Per jaar zijn er grote verschillen in de volumes die zijn onttrokken, van vrijwel niets tot $9 \times 10^6 \text{ m}^3$. Het totale onttrekkingsvolume bedraagt ruwweg $90 \times 10^6 \text{ m}^3$.



Figuur 7.11 Volume zand dat uit het systeem van de Beneden-Zeeschelde gehaald werd [m^3 in beun]. De verdiegingsperiodes in geel (LTV V&T-rapport K-19).

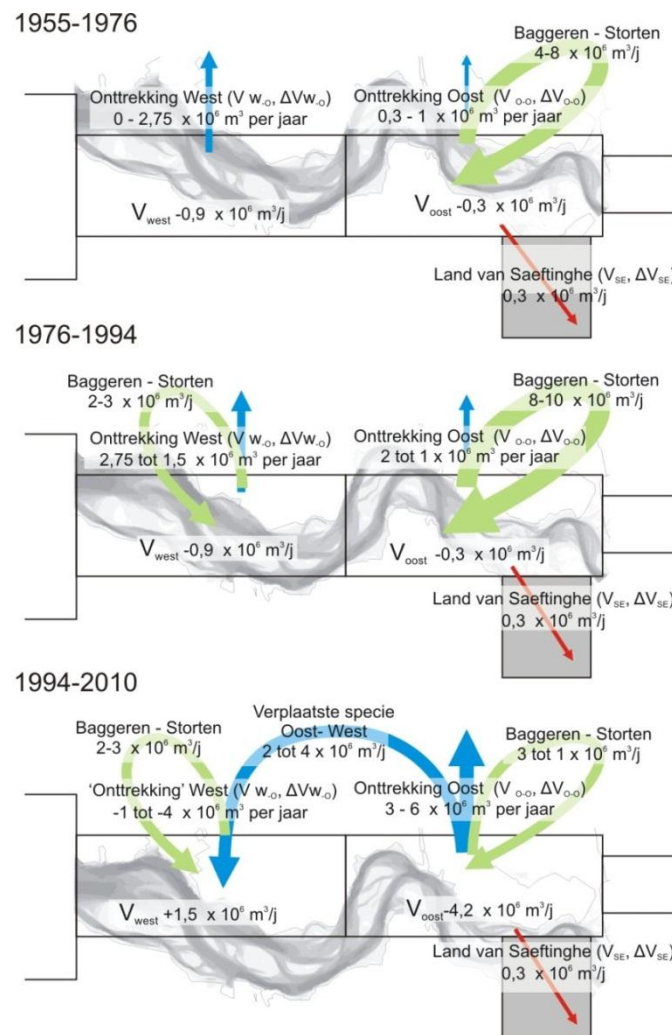
Figuur 7.12 is een grafiek met de onttrekkingsvolumes van de Westerschelde, die zowel de opgegeven zandwinvolumes, als het verschil tussen het baggeren en storten omvatten. Het totale onttrekkingsvolume voor de Westerschelde bedraagt voor dezelfde periode ongeveer $140 \times 10^6 \text{ m}^3$.

De onttrekkingsvolumes zijn zowel voor de Zeeschelde als de Westerschelde omvangrijk. Het onttrekken van sediment is in ieder geval in periode vanaf de jaren '50 van de 20^e eeuw een belangrijke antropogene sink voor sediment geworden.



Figuur 7.12 Totaal Volume sediment dat uit de Westerschelde is onttrokken [m^3 in beun].

Vanaf de jaren '70 worden de onttrekkingsvolumes gekoppeld aan 'overschotten' in de sedimentbalans (Bakker en de Looff, 1986; Roelse en Arends, 1999). Deze 'overschotten' waren het gevolg van de verruiming van de vaarweg. Vanaf de omschakeling naar de oost-weststrategie voor het baggeren en storten (Vroon, 1993) is het zwaartepunt van zandwinning verschoven van het westen naar het oosten. In figuur 7.13 (naar het LTV V&T-rapport G-2) is op hoofdlijnen weergegeven hoeveel onttrekking in het westelijke en in het oostelijke deel van de Westerschelde heeft plaatsgevonden in drie periodes. Ook de bagger- en stortvolumes voor de oostelijke en de westelijke helft zijn in figuur 7.13 weergegeven. Omdat binnen deze periodes de waarden voor onttrekkingen en het baggeren en storten variëren is steeds een bandbreedte aangegeven.



Figuur 7.13 Schematische weergave van de ingrepen in de Westerschelde in drie periode (naar LTV V&T-rapport G-2).

In de eerste periode, van 1955 tot 1976, is sprake van zandwinning in beide helften, waarbij het grootste volume uit het westen is onttrokken. Gebaggerde specie werd teruggestort in de directe nabijheid. De afname van het sedimentvolume in de oostelijke helft was kleiner dan die in de westelijke helft. In de periode van 1976 tot 1994 was het patroon vergelijkbaar, maar namen de volumes baggeren, storten en onttrekkingen toe. In de periode na 1994 tot 2010 verandert het patroon wel, omdat in die periode veel sediment in het oosten wordt gebaggerd en in het westen wordt gestort. Het baggervolume dat in het oosten wordt gebaggerd en gestort neemt af en ook het totale volume dat wordt gebaggerd wordt kleiner. In de overgang naar deze derde periode is sprake van een trendbreuk in de ontwikkeling van de sedimentvolumes. Het sedimentvolume in de oostelijke helft neemt sterk af en in de westelijke helft neemt het toe.

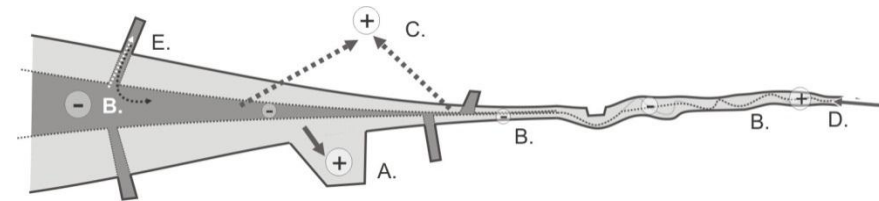
7.5 CONCLUSIES

In figuur 7.14 is schematisch weergegeven waar de sinks en sources in het Schelde-estuarium liggen na ruwweg de jaren '60 van de vorige eeuw. Hierbij hoort de onderstaande toelichting:

- A. Van de aangrenzende belangrijke sedimentatiegebieden in de Westerschelde is alleen het Land van Saeftinghe nog aanwezig als put voor sediment. De andere gebieden zijn vanaf de jaren '50 tot in de jaren '70 afgedamd en/of omgevormd tot havenbekkens;
- B. Doorgaand uitruimen van de geulen in Zeeschelde en Westerschelde, waardoor deze een bron van sediment vormen. Lokaal vindt sedimentatie plaats op de platen en in sommige nevengeulen in de Westerschelde (Vaarwater, Middelgat) en in de Durme;
- C. Het onttrekken van sediment vormt een belangrijke sink voor Westerschelde en Beneden-Zeeschelde;

D. Gereduceerde aanvoer van sediment vanuit het achterland, door gecontroleerde bovendebieten. Vanaf de jaren '90 van de vorige eeuw ook afnemende aanvoer door toenemende waterzuivering;

E. De havenbekkens vormen geen permanente sink voor sediment. Het sediment dat in havenbekkens wordt afgezet, wordt gebaggerd en weer in het estuarium verspreid.



Figuur 7.14 Schematische weergave van de bronnen (-: 'sources') en putten (+: 'sinks') in het Schelde-estuarium, in de periode na ongeveer 1960.

8

Platen als sinks

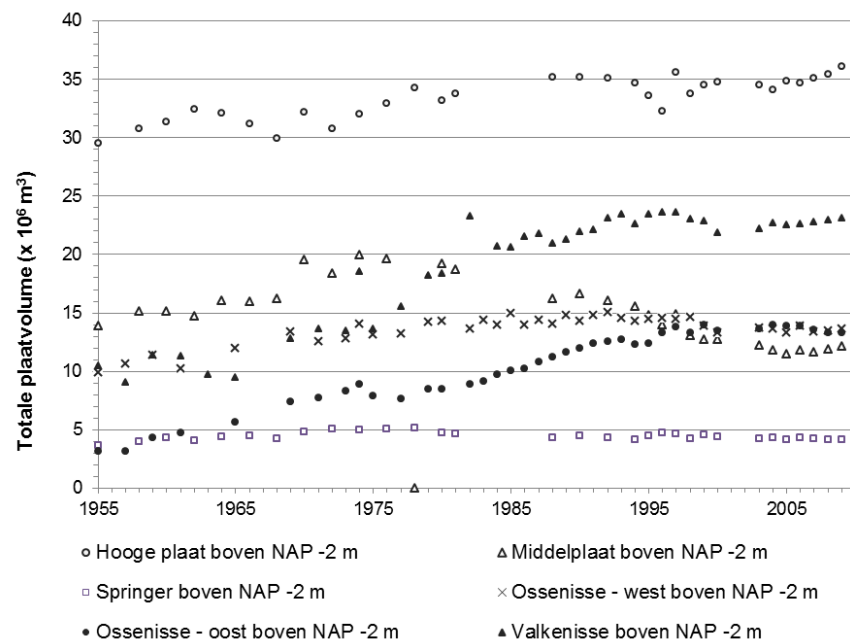
8.1 INLEIDING

Het intergetijdegebied dat bestaat uit slikken en platen kan een sink vormen voor sediment, als het sedimentvolume ervan netto toeneemt. De hoogte van de platen is toegenomen in de Westerschelde. Tegenwoordig zijn enkele plaatcomplexen zo hoog dat ze ruimte bieden aan schorren. In dit hoofdstuk wordt verkend in hoeverre de platen een sink hebben gevormd.

8.2 PLATEN ALS SINKS

Het sedimentvolume in de plaatcomplexen is weergegeven in de (figuur 8.1). De ligging is weergegeven in figuur 8.2. De plaatcomplexen omvatten samen een sedimentvolume van ruim $100 \times 10^6 \text{ m}^3$, waarbij de Hooge platen het grootste sedimentvolume bergt. Voor de rol als sink is belangrijk in hoeverre het sedimentvolume in de loop van de tijd is veranderd. De verandering van het plaatvolume is weergegeven in de grafiek in figuur 8.3. In totaal is het sedimentvolume op de platen toegenomen met ruim $30 \times 10^6 \text{ m}^3$. De sink die de platen vormen is aanzienlijk, maar de sink is wel kleiner dan de sink die de sedimentonttrekking vormt en kleiner dan de sedimentatie in het Middelgat.

De grootste toenames van het sedimentvolume hebben plaatsgevonden op de oostelijk gelegen plaatcomplexen: van Valkenisse (inclusief de Plaat van Walsoorden) en Ossenissee-oost. Deze twee plaatcomplexen dragen rond de 70% bij aan de totale toename.

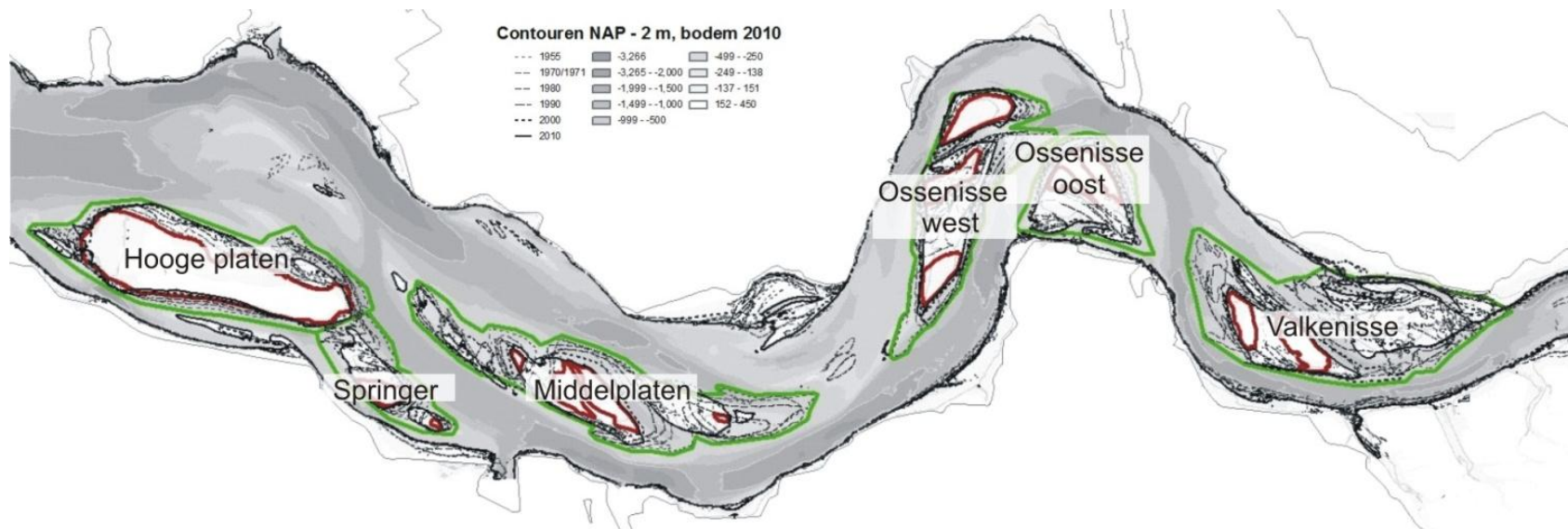


Figuur 8.1 Grafiek met het sedimentvolume van de platen boven NAP -2 m

Het sedimentvolume van de platen is niet constant toegenomen in de tijd. Dat betekent dat de rol als sink in de tijd varieert. De sterkste toename van het totale sedimentvolume in de platen heeft plaatsgevonden tot halverwege de jaren '90. Per plaatcomplex verschilt het moment waarop de toename van het sedimentvolume is gestopt. Na halverwege de jaren '90 is het volume van de

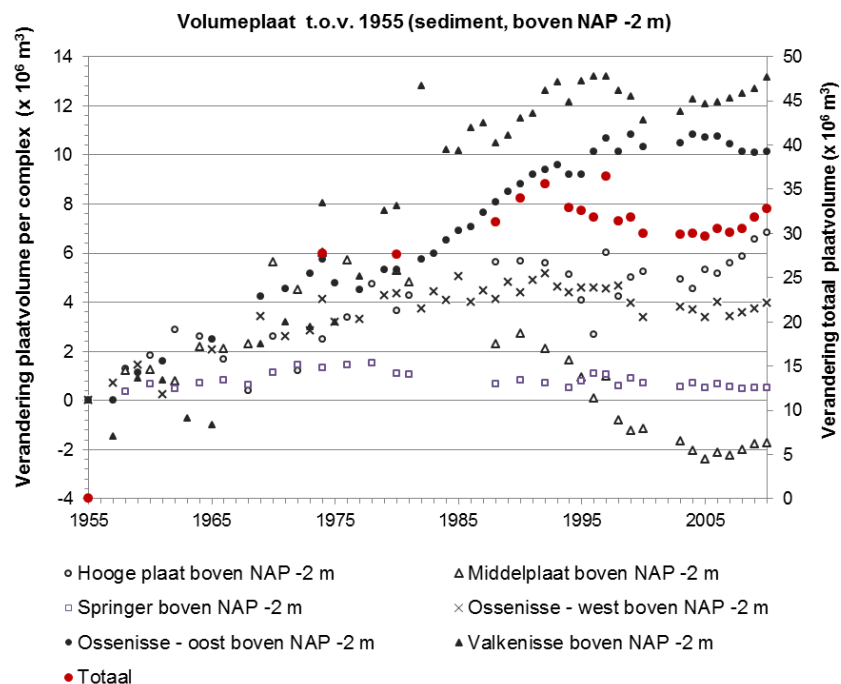
Plaatcomplex van Valkenisse gestabiliseerd. Voor het plaatcomplex van Ossenissee-oost ligt het moment van stabilisatie rond het begin van de 21^e eeuw. Het sedimentvolume van het Middelpaatcomplex is zelfs afgenomen vanaf het begin van de jaren '90. Dit plaatcomplex speelt dus een bescheiden rol als source. Op basis van de volumeontwikkeling van de plaatcomplexen in figuur 8.3 kan worden vastgesteld dat de plaatcomplexen vanaf tenminste 1955 tot halverwege de jaren '90 een rol hebben gespeeld als sink. Deze sink was groot in de oostelijke helft van de Westerschelde en kleiner of zelfs afwezig in het midden en westen.

Figuur 8.2 Overzichtskaart van de plaatcomplexen, met de contouren van de NAP – 2 m lijn. In groen de buitengrenzen van de kuberingsgebieden en in rood de grenzen van de gekubeerde hoge delen..



8.3 PLAATHOOGTE EN AREAAL

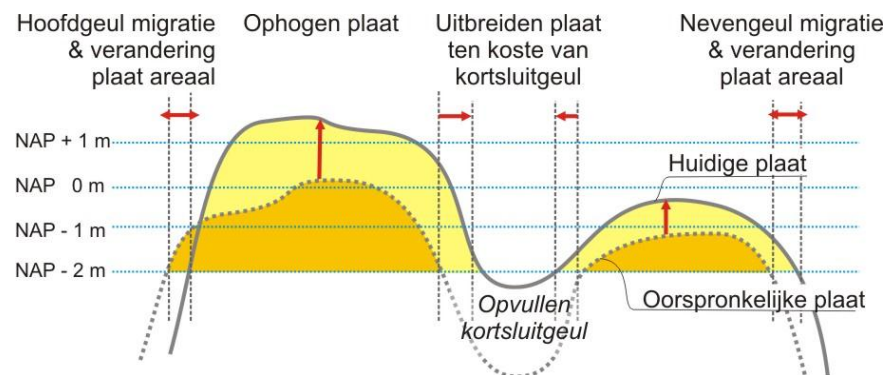
De verandering van het sedimentvolume van de platen bestaat uit veranderingen van het areaal en van de hoogte. In figuur 8.4 is, in een schematische dwarsdoorsnede, aangegeven dat de veranderingen in het areaal bestaan uit een combinatie van (i) het verplaatsen van de hoofd- en nevengeulen en (ii) de uitbreiding van de platen op de plekken waar eerder kortsluitgeulen aanwezig waren. De opvulling van de kortsluitgeulen zelf vindt plaats beneden de NAP – 2m en deze opvulling draagt niet bij aan de toename van het plaatvolume. De sedimentatie in de nevengeul vormt wel de basis voor de uitbreiding van de platen.



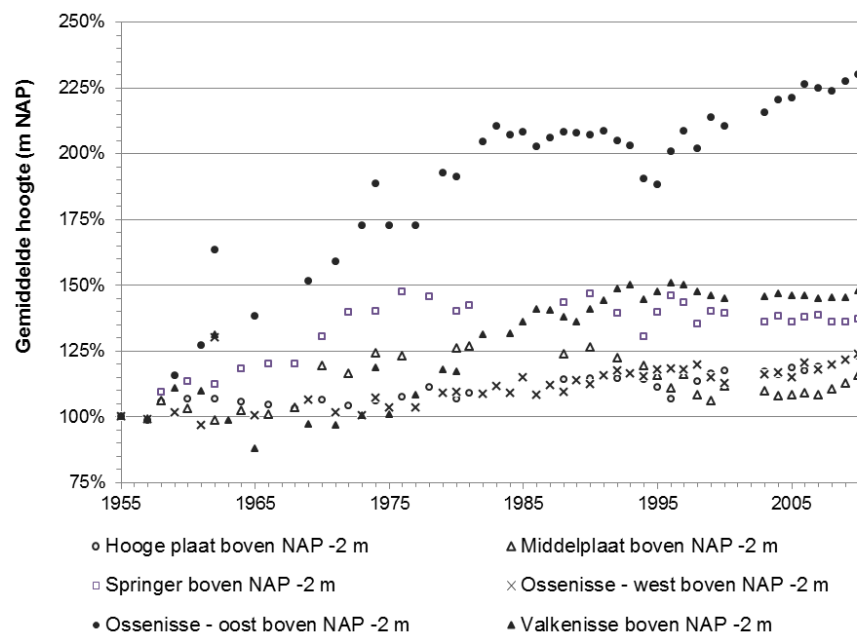
Figuur 8.3 Grafiek met de verandering ten opzichte van 1955 van het sedimentvolume van de platen boven NAP -2 m.

De relatieve verandering van het areaal ten opzichte van de situatie in 1955 is uitgezet in de grafiek in figuur 8.5 en de relatieve verandering van de hoogte in figuur 8.6. De (relatieve) veranderingen verschillen nogal per plaatcomplex, waarbij de grootste veranderingen steeds optreden bij de platen van Ossenisse-oost. De gemiddelde hoogte van de platen neemt over het algemeen toe, of blijft stabiel. Het areaal van de platen kan zowel toe- als afnemen.

Duidelijke aanwijzingen over de wijze waarop de platen als sink voor sediment fungeren zijn niet af te leiden uit de ontwikkeling van de hoogte en het areaal. Het lijkt bijvoorbeeld niet zo te zijn dat bovenop de platen sediment wordt geborgen waarbij de hoogte van de platen toeneemt en de afname van het areaal verantwoordelijk is voor de stabilisatie dan wel afname van het sedimentvolume. Lokale ontwikkelingen, zoals beschreven in het LTV V&T-rapport K-16 lijken bepalend te zijn voor de ontwikkeling van het sedimentvolume. Correlaties met andere ontwikkelingen, zoals de toename van het niveau van hoogwater en de afname van het aantal en de omvang van de kortsluitgeulen, ontbreken. De platen zijn dus geen sink die het hoogwater volgen. Mogelijk is er bij het plaatcomplex van Valkenisse een verband tussen de toename van het sedimentvolume en het storten van sediment in de nabijheid van het complex. Waarschijnlijk versterkt op die plekken die zo hoog zijn dat kweldervegetatie mogelijk werd en de vegetatie de sedimentatie kon gaan versterken. De kweldervegetatie heeft dus een zelfversterkend effect op de plaathoogte.



Figuur 8.4 Schematische dwarsdoorsnede van de verschillende ontwikkelingen die plaats kunnen vinden bij het toenemen van het plaatvolume.

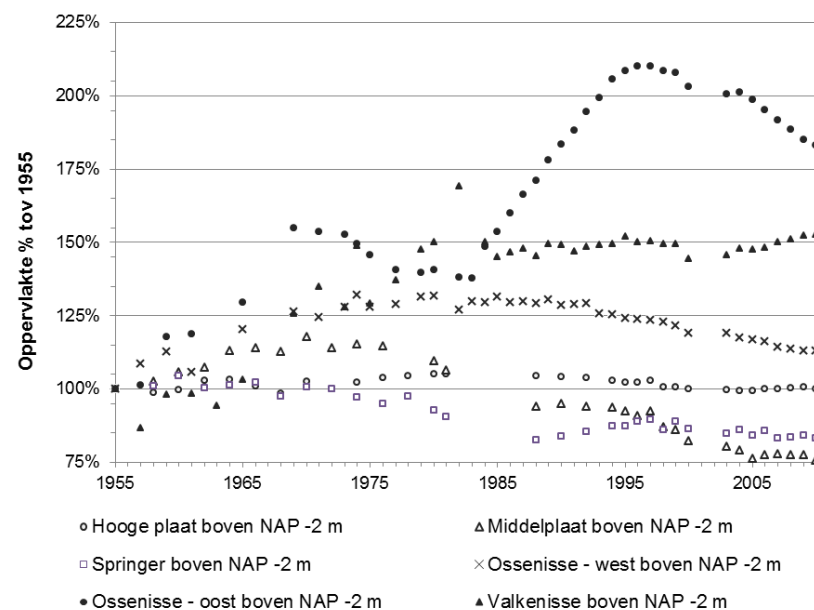


Figuur 8.5 Grafiek met de relatieve verandering van de gemiddelde hoogte van de platen boven NAP -2 m, relatief t.o.v. de uitgangssituatie in 1955.

8.4 DE ROL VAN DE SLIKKEN EN DE SCHORREN

De slikken en schorren langs de randen van de Westerschelde spelen mogelijk ook een rol als sink voor sediment. De rol van het Land van Saeftinghe als sink voor sediment kwam al eerder ter sprake (zie ook LTV V&T-rapport G-2) en zal hier verder niet worden behandeld. Van de slikken en schorren zijn minder

hoogtegegevens beschikbaar dan van de platen en daarom is geen analyse van de volumeontwikkelingen uitgevoerd.



Figuur 8.6 Grafiek met de relatieve verandering van het areaal van de platen boven NAP -2 m, relatief t.o.v. de uitgangssituatie in 1955.

Voor de schorren langs de randen van de Westerschelde geldt dat de rol als sink of source afhangt van de balans tussen de sedimentatie op het schor, de nieuwvorming van schor en de (schorrand)erosie. De rol van het schor kan daarom van locatie tot locatie verschillen. Omdat het areaal schor, exclusief het Land van Saeftinghe relatief klein is, is de rol als sink of source van die andere schorren naar verwachting beperkt.

De hoogte van de slikken is bekeken in een aantal raaien, waarvan een beschrijving van (een deel van deze raaien) is opgenomen in LTV V&T-rapport

K-16. In de hoogte van de slikken en de veranderingen in de hoogte is geen duidelijke lijn te ontdekken. Grote veranderingen in de hoogte, zoals die bij de platen zijn opgetreden ontbreken op de slikken. Het lijkt dat lokale factoren, zoals de aanstroming vanuit de geulen over de slikken en veranderingen daarin de ontwikkelingen bepalen, zoals o.m. is beschreven voor Bath (Sinke, 2011). Het areaal van de slikken is overwegend afgenomen, waarbij op veel plekken de afname tot stilstand is gebracht door het aanbrengen van bestortingen. De slikken lijken geen structurele rol als source of sink te spelen in de Westerschelde

8.5 CONCLUSIES

De platen in de Westerschelde hebben als een sink gefungeerd, waarbij de grootste sedimentvolumes zijn geborgen in de plaatcomplexen van Valkenisse en Ossensisse-oost. De slikken en schorren (met uitzondering van het Land van Saeftinghe) spelen waarschijnlijk geen structurele rol als sink of source

9

Sinks en sources in de toekomst

9.1 INLEIDING

In de voorgaande hoofdstukken is de geschiedenis geschetst van de sources en sinks voor sediment in het Schelde-estuarium. In de hoofdstukken twee en drie is de relatie gelegd tussen de komberging, waterstanden en de sources en sinks. In dit hoofdstuk worden de uitkomsten vertaald naar verschillende toekomstscenario's.

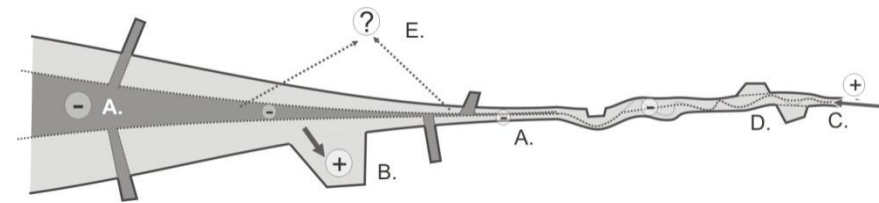
9.2 UITGANGSPUNTEN EN AANNAMES

Het belangrijkste uitgangspunt voor de toekomstscenario's is dat de omtrek van het Schelde-estuarium in zijn huidige vorm (grotendeels) hetzelfde blijft. Ook worden geen grootschalige veranderingen verwacht in de arealen van schorren, tidale en subtidale habitats. Een ontpoldering van de Hedwigepolder levert ten opzichte van de omvang van het estuarium ter plaatse een extra sink van beperkte omvang. In de Zeeschelde leveren de aanleg en ingebruikname van

GOG-en en GGG-en nieuwe sinks. Deze gebieden hebben over het algemeen een relatief grote omvang ten opzichte van het estuarium ter plaatse.

Deze sinks en sources (figuur 9.1) zijn:

- A. Geulen: source bij toename van de doorstroomoppervlakte;
- B. Land van Saeftinghe: sink;
- C Aanvoer via de rivieren: source;
- D. GOG-en en GGG-en: sinks;



Figuur 9.1 Schematische weergave van de verwachte toekomstige bronnen (=: 'sources') en putten (=: 'sinks') in het Schelde-estuarium.

Een vraagteken vormt de omvang van de antropogene sink in de vorm van onttrekkingen (hoofdzakelijk zandwinning), omdat de omvang van deze sink afhankelijk is van beleidskeuzes.

In de Geul langs Hoofdplaat en in het Middelgat zal waarschijnlijk sedimentatie blijven plaatsvinden, gerelateerd aan de autonome ontwikkeling van deze geulen, deze gebieden blijven naar verwachting sinks.

De platen, slikken en schorren (met uitzondering van het Land van Saeftinghe) zullen naar verwachting geen substantiële rol spelen als sink of source in de Westerschelde.

9.3 SCENARIO'S EN ONTWIKKELINGEN

Bovenstaande sinks en sources zijn het uitgangspunt bij de analyse van drie kwalitatief beschreven ontwikkelingen van de waterstanden:

1. Doorgaande stijging van de zeespiegel;
2. Verdere toename van het niveau van hoogwater;
3. Verdere afname van het niveau van laagwater.

Doorgaande stijging van de zeespiegel

Het effect van de stijging van de zeespiegel op de kombergingsvolume is weergegeven in figuur 3.4. Bij een stijging van de zeespiegel neemt het kombergingsvolume toe. Bij een groter kombergingsvolume hoort een grotere doorstroomoppervlakte van de geul. De geulen zullen bij een doorgaande stijging van de zeespiegel een source vormen.

Verandering van het niveau van hoogwater;

In figuur 3.2 is schematisch weergegeven dat de toename van het niveau van hoogwater leidt tot een toename van het kombergingsvolume. Bij een groter kombergingsvolume hoort een groter doorstroomoppervlakte van de geulen. De geulen zullen bij een verdere toename van het niveau van hoogwater een source vormen. Bij een gelijkblijvend niveau van hoogwater zal de geul geen rol als sink of source vervullen en bij een afname van het niveau van hoogwater zullen de geulen een rol als sink vervullen.

Verandering van het niveau van laagwater

Het gevolg van een afname van het niveau van laagwater is een toename van het kombergingsvolume, zoals schematisch is weergegeven in de dwarsdoorsnede in figuur 3.3. Omgekeerd zal een toename van het niveau van laagwater leiden tot een afname van het kombergingsvolume. Bij een groter kombergingsvolume

hoort een groter doorstroomoppervlakte en omgekeerd. Bij een afname van het niveau van laagwater vormt de geul een source en bij een toename een sink.

De invloed van de stijgende zeespiegel betekent in het gehele estuarium dat de geulen een rol als source van sediment vervullen. De omvang van deze source is mede afhankelijk van de omvang van het tidaal. Deze veranderingen van de gemiddelde zeespiegel is niet los te zien van eventuele veranderingen van de niveaus van hoog- en laagwater. Of de geulen daadwerkelijk deze rol als source vervullen zal dan ook afhangen van de gecombineerde ontwikkelingen van de waterstanden.

De ingrepen in het estuarium en de gevolgen daarvan voor het getij en de doorwerking van al uitgevoerde ingrepen zullen daarom medebepalend zijn voor de omvang van de source die de geulen in de toekomst kunnen vormen. In de huidige constellatie van het Schelde-estuarium zijn er weinig natuurlijke sinks. Als in de toekomst de geulen (net als in de afgelopen periode) een source vormen, dan zijn er relatief weinig plekken waar sediment geborgen kan worden. Hiervoor zijn vooral de sedimenterende geulen Vaarwater langs Hoofdplaat en het Middelgat beschikbaar evenals de platen, slikken en schorren.

9.4 OORZAAK OF GEVOLG?

De sink en source benadering op basis van de relatie tussen kombergingsvolume en doorstroomoppervlakte in de hoofdstukken 2 tot en met 9 is een vereenvoudiging van de werkelijkheid, die bewust voorbijgaat aan de verschillende morfodynamische terugkoppelingen (figuur 2.4). Eén van de gevolgen van de gekozen benadering is dat de veranderingen in de niveaus van hoog- en laagwater hier worden voorgesteld als een oorzaak en de daaruit volgende verandering van de doorstroomoppervlakte als een gevolg. In werkelijkheid zijn de veranderingen van het getij mede een gevolg van de veranderingen in de morfologie (zie onder andere LTV V&T-rapport G-13). Het

causale verband kan daarmee best omgekeerd zijn (geweest), bijvoorbeeld in de situaties waar de antropogene sinks (onttrekkingen baggeren) en sources (storten) hebben geleid tot een ander doorstroomoppervlakte en een toename van de getijslag. De causale verbanden voor de verschillende natuurlijke ontwikkelingen en menselijke ingrepen zijn anders, waardoor de beschrijving erg complex gaat worden. Het maakt voor de uiteindelijke (hier geschetste) beeldvorming van de sinks en sources echter niet uit.

10

Deel B Inleiding

10.1 VARIA

In het LTV V&T-rapport K-16 (Ontwikkeling mesoschaal Westerschelde, factsheets) zijn beschrijvingen opgenomen van de mesoschaal morfologische ontwikkelingen per macrocel. Vanwege de nadruk op de lokale ontwikkeling biedt dat rapport weinig ruimte voor een aantal overkoepelde observaties en hypothesen. Daarom zijn in dit rapport een aantal (de hierop volgende) hoofdstukken over deze onderwerpen opgenomen. De onderwerpen hebben betrekking op morfologische ontwikkeling op mesoschaal die op meerdere plekken in het estuarium spelen.

Dit deel B van het rapport heeft geen apart hoofdstuk conclusies. Per hoofdstuk worden conclusies of consequenties voor het beheer gepresenteerd.

11

Plaathoogte

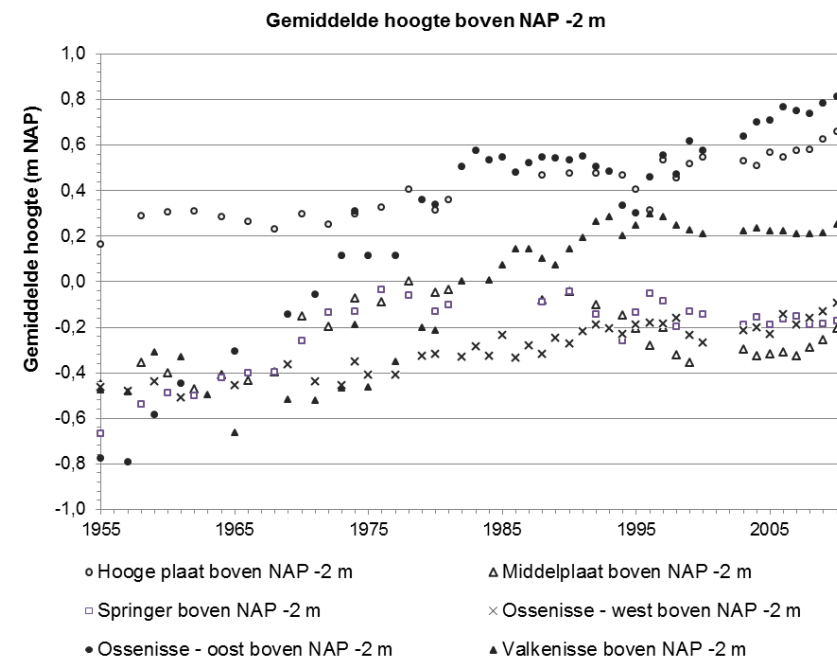
11.1 INLEIDING

In hoofdstuk 8 is stilgestaan bij de rol die platen hebben gespeeld als sink. Hierbij is vastgesteld dat de veranderingen van het plaatvolume bestaan uit veranderingen van het areaal en van de hoogte van de platen (figuur 8.4). In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op de ontwikkeling van de plaathoogte. De reden om dit aspect nader te onderzoeken is dat de hoogte van platen in verschillende (conceptuele) modellen van getijdebekkens wordt verondersteld mee te groeien met de stijgende zeespiegel (zie onder andere Louters en Gerritsen, 1994) en een relatie wordt verondersteld tussen de hoogte van de platen en het niveau van hoogwater (Eysink en Biegel, 1992). De relatie tussen de hoogte van intergetijdeplaten en het niveau van hoogwater is conceptueel logisch, omdat de maximale hoogte van de plaat wordt gelimiteerd door de hoogst optredende waterstand. En dergelijke relaties zijn handig, omdat daarmee duidelijk wordt welke sedimentberging op de platen zal plaatsvinden. In eerdere studies is al vastgesteld dat de hoogte van de platen in de Westerschelde sneller is toegenomen dan het niveau van hoogwater (Huijs, 1995; Alkyon, 2006). Als gevolg daarvan zijn de droogvalpercentages op de platen toegenomen. De platen worden hoger en droger. In dit hoofdstuk wordt gekeken

of in de Westerschelde verbanden bestaan tussen de plaathoogte en het niveau van hoogwater.

11.2 PLAATHOOGTE IN RUIMTE EN TIJD

Figuur 11.1 toont een grafiek met de gemiddelde hoogte van de plaatcomplexen in de periode 1955-2010.



Figuur 11.1 Grafiek met de gemiddelde hoogte van de platen boven NAP -2 m

De hoogte van deze plaatcomplexen, waarvan de ligging is aangegeven in figuur 8.2, is niet direct gekoppeld aan de hoog- en laagwaterstanden in de Westerschelde. Het niveau van hoogwater loopt op van west naar oost in de Westerschelde (zie bijvoorbeeld figuur 3.5). De Hooge platen liggen in het westen van de Westerschelde en zijn, zoals de naam al aangeeft inderdaad hoog. Deze plaat is zelfs zo hoog dat er al meer dan tien jaar schorvegetatie is gevestigd. De hoogste plaat is de Plaat van Ossenis, met een gemiddelde hoogte van NAP +0,8 m (voor alle delen hoger dan NAP -2 m). Deze plaat is daarmee hoger dan het oostelijker gelegen plaatcomplex van Valkenisse, waar de gemiddelde hoogte NAP 0,2 m bedraagt.

In figuur 11.1 is te zien dat de ontwikkeling van de gemiddelde hoogte per plaatcomplex verschillend verloopt. Deze verandering gaat niet gelijk op met de toename van het niveau van hoogwater. Tegenwoordig zijn delen van de platen zelfs hoger geworden dan het niveau van hoogwater. Deze hoogtetoename verklaart de vestiging van pioniervegetatie en de vorming van de kwelders op de Hooge platen en de Platen van Valkenisse.

De ruimtelijke distributie van de hoogte van de platen gaat in de Westerschelde dus niet gelijk op met het niveau van hoogwater en ook de temporele veranderingen in de hoogte gaan niet gelijk op met het niveau van hoogwater. In de Westerschelde lijkt een relatie tussen plaathoogte en het niveau van hoogwater daarom niet te gebruiken. Uiteindelijk zal het toenemen van de hoogte van de platen, slikken en de schoren worden gelimiteerd door de mate van overstromen. Voor de platen in de Westerschelde is die situatie nog niet bereikt. Andere factoren lijken de hoogte en hoogtetoename van de platen te bepalen.

11.3 ANDERE FACTOREN?

Het ontbreken van een verband tussen de plaathoogte en het niveau van hoogwater roept de vraag op welke andere factoren bepalend kunnen zijn voor de hoogte van een plaat en de veranderingen daarvan. Mogelijke factoren zijn:

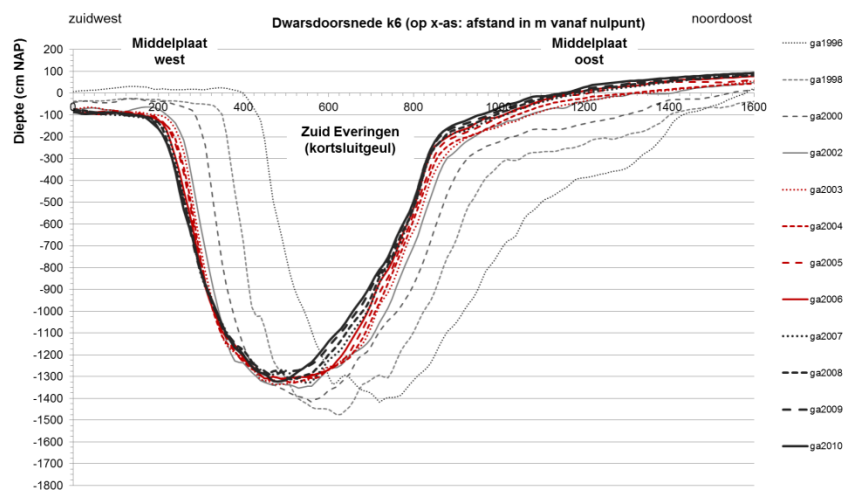
- De (aanwezigheid van) kortsluitgeulen;
- Veranderde drainage en afvoer van sediment;
- De beschikbaarheid van sediment, bijvoorbeeld door de (extra netto) aanvoer van sediment door het storten in de nabijheid;
- Golfwerking (voor de Hooge platen);
- Vegetatie, zodra de hoogte van de platen dusdanig is dat deze zich kan vestigen.

Deze factoren worden hier één voor één besproken.

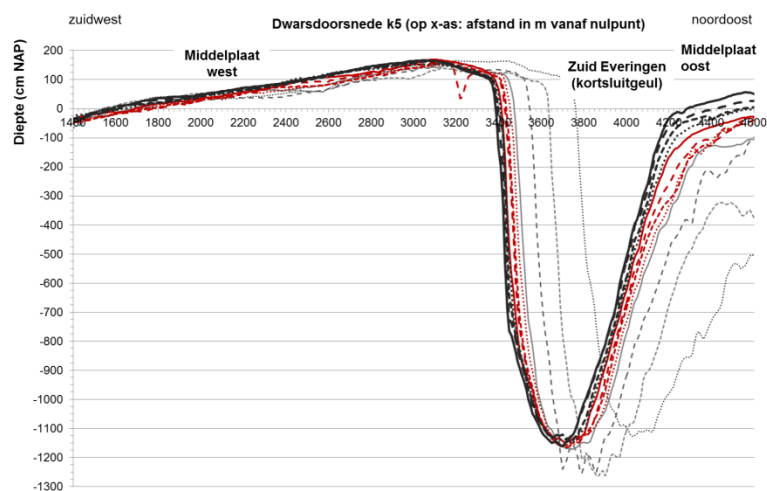
Kortsluitgeulen

Aan kortsluitgeulen wordt een vereffende rol toegeschreven (Cleveringa, 2007) in de ontwikkeling van de platen. Bij de verplaatsing van de kortsluitgeulen door het plaatcomplex wordt de plaat aan de ene zijde afgebroken en aan de andere zijde weer opgebouwd. In de dwarsdoorsnede k6 in figuur 11.2 is zichtbaar dat de plaathoogte hoger is op de plek waar de geul heeft gelegen. Aan de westzijde, waar de geul naar toe migreert, is de plaat lager geworden. In de meer noordelijke gelegen dwarsdoorsnede k5 in figuur 11.3 verandert vrijwel niets aan de plaathoogte aan de westzijde.

Ook andere dwarsdoorsneden door kortsluitgeulen (niet getoond) laten geen duidelijke relatie zien tussen de migratie van de kortsluitgeul en de hoogte van de aangrenzende platen. Een fysische beschrijving van de mechanismen en zandtransporten die tot een vereffening van de platen zouden moeten leiden is niet bekend.



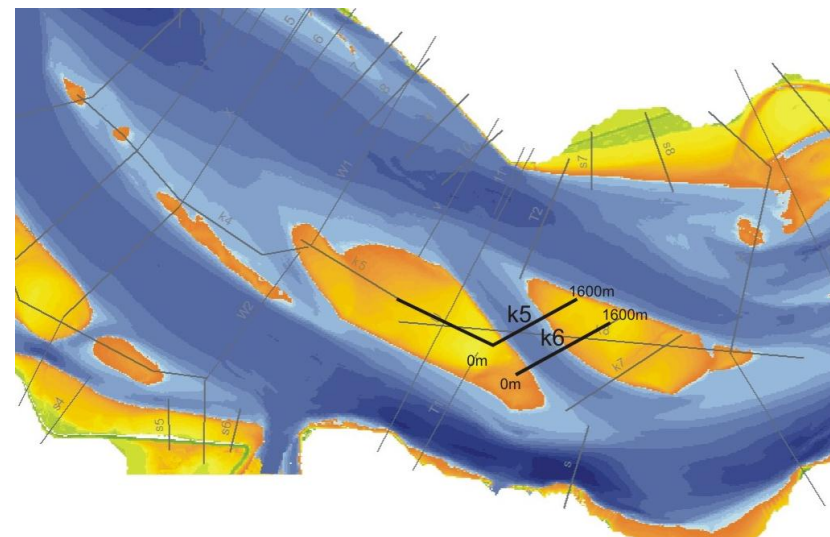
Figuur 11.2 Dwarsdoorsnede K6 (locatie in figuur 11.4).



Figuur 11.3 Dwarsdoorsnede K5 (locatie in figuur 11.4).

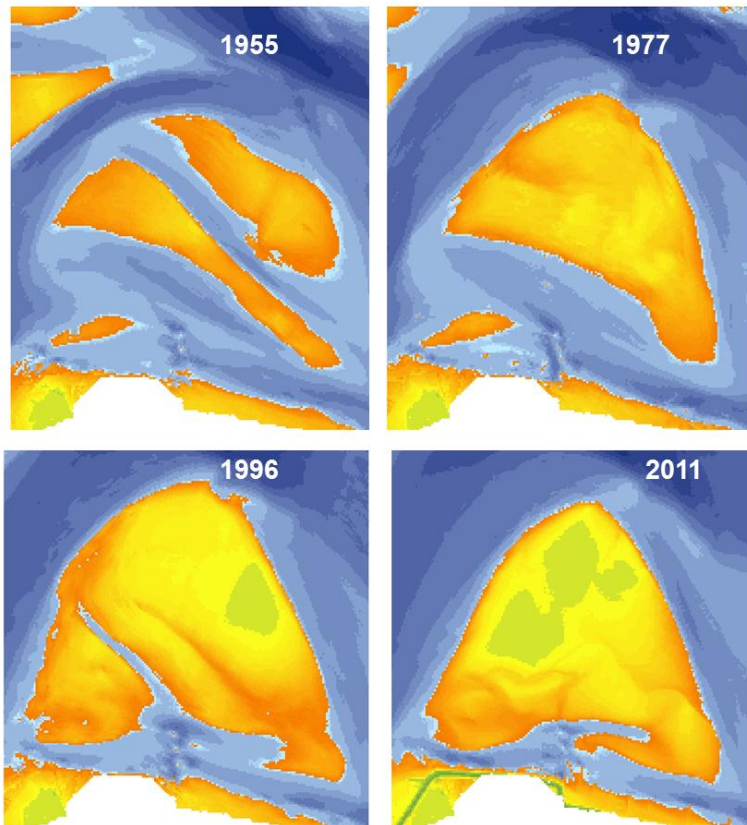
De rol die de kortsluitgeulen spelen bij het bepalen van de plaathoogte is ingegeven door de observatie dat sprake lijkt te zijn van een simultane ontwikkeling: De platen worden hoger én de kortsluitgeulen verdwijnen (Cleveringa, 2007). Het Middelplaat plaatcomplex waarvan de hoogte het minst is toegenomen is een van de twee plaatcomplexen waar nog kortsluitgeulen aanwezig zijn.

Nieuwe analyses van de ontwikkeling van de plaathoogte (figuur 11.1) laten zien dat voor een deel van de plaatcomplexen de toename van de hoogte gestopt lijkt zijn. De afname van het aantal en omvang van kortsluitgeulen en schartjes, waarmee de omtrek van de platen steeds 'gladder' wordt, lijkt door te gaan. Een voorbeeld van deze doorgaande ontwikkeling is getoond in figuur 11.5. De nieuwe observaties trekken de simultane ontwikkeling van plaathoogte en de afname van de kortsluitgeulen in twijfel.



Figuur 11.4 Locatie van dwarsdoorsnede k6 in macrocel 3.

Zelfs als de toename van de plaathoogte simultaan zou optreden met de afname van de kortsluitgeulen, betekent dit niet noodzakelijkerwijs dat er een causaal verband is tussen de toename van de plaathoogte en het verdwijnen van de kortsluitgeulen.



Figuur 11.5 Kaarten van de Platen van Ossenisse in vier jaren.

Mogelijke verbanden zijn:

1. De platen worden hoger, omdat de kortsluitgeulen verdwijnen;
2. De kortsluitgeulen verdwijnen, omdat de platen hoger worden;
3. Er is geen verband. Er zijn twee verschillende processen verantwoordelijk voor beide ontwikkelingen;
4. De sedimentatie in de kortsluitgeulen (waardoor ze verdwijnen) en de sedimentatie op de platen worden veroorzaakt door hetzelfde proces, bijvoorbeeld door veranderingen in het verhang van hoofd- naar nevengeul en vice versa.

Op dit moment zijn geen argumenten voor of tegen een van deze vier verbanden beschikbaar.

Vanwege het ontbreken van een fysische verklaring en de twijfel over het simultane karakter van de ontwikkeling van de plaathoogte en de kortsluitgeulen wordt de vereffende rol van de kortsluitgeulen voor de ontwikkeling van de platen minder plausibel geacht. De modelsimulaties waarin de rol van kortsluitgeulen is onderzocht, biedt over dit aspect geen uitsluitsel (LTV V&T-rapport K-20).

Veranderde drainage en afvoer van sediment

In Cleveringa (2007) is beschreven hoe de toename van de plaathoogte leidt tot een andere wijze van afstromen van het water van de platen. Bij hogere, meer aaneengesloten platen lijkt het waarschijnlijk dat de afvoer van sediment tijdens het afstromen van de platen afneemt. Het beschreven proces versterkt zichzelf. Of dit een plausibel mechanisme is en wat de bijdrage ervan kan zijn is niet nader onderzocht.

Storten in de nabijheid

In verschillende rapporten is gewezen op het mogelijk verband tussen storten en de toename van de hoogte van platen en slikken. Dit mogelijke verband tussen

stortingen en veranderingen van de plaathoogte is bijvoorbeeld aangegeven voor het Plaatcomplex van Valkenisse en de stortingen in de Schaar van Waarde (Cleveringa, 2007). Ook voor de Plaat van Baarland is een dergelijk verband gelegd. De snelle hoogtetoename van de slikken van het Land van Saeftinghe is toegeschreven aan grote stortingen in de directe nabijheid op de locatie Konijneschor (Krijger, 1993; Storm & Pieters, 1994). Huijs (1995) wijst op stortingen in het Gat van Ossensisse en de toename van plaathoogte van het plaatcomplex van Ossensisse-oost. Hierbij wordt opgemerkt dat de stortvolumes in het Gat van Ossensisse voor 1994 relatief klein zijn, terwijl de hoogte dan al toeneemt.

De conclusie is dan ook dat lokaal het mogelijk is dat stortingen in de nabijheid van platen en slikken voor een extra netto aanvoer van sediment hebben gezorgd, leidend tot een toename van de hoogte.

Golfwerking (voor de Hooge platen)

De westzijde van de Hooge platen is blootgesteld aan meer golfwerking dan de andere platen in de Westerschelde, vanwege de ligging bij de monding. Over het algemeen wordt golfwerking op de platen een afvlakkende of eroderende werking toegeschreven (Louters en Gerritsen, 1994; van Zanten en Adriaanse, 2008). In gebieden met brekende golven en golfgedreven dwarstransporten kan de golfwerking ook een opbouwende werking hebben. Deze opbouwende werking heeft bijvoorbeeld geleid tot de vorming van zandbanken in de mondingen van de Grevelingen en het Haringvliet (zie bijvoorbeeld Cleveringa e.a., 2007 en de referenties hierin). Relatief hoge platen zijn ook aanwezig bij de zeegaten van de Waddenzee (Noorderhaaks/Razende Bol bij het Marsdiep; Richel in het Vlie; Koffiebonenplaat bij het Zeegat van Ameland). Het is niet uitgesloten dat de golven aan de westzijde van de Hooge platen hebben bijgedragen aan de opbouw ervan.

Vegetatie

Als platen voldoende hoog worden (hoger dan gemiddeld hoogwater) kan kweldervegetatie vestigen. Het is overigens niet zo dat de hoogte de enige factor is die een succesvolle begroeiing bepaalt, getuige het ontbreken van uitgebreid kwelderareaal op de gemiddeld allerhoogste platen, die van Ossensisse-oost. Mogelijk zijn de stroomsnelheden hier te hoog voor het ontstaan van kwelders. De aanwezigheid van de vegetatie beïnvloedt de stromingscondities. De sedimentatie kan toenemen doordat sediment effectief wordt ingevangen door de vegetatie. Hierdoor kunnen de al hoge delen van de platen verder in hoogte toenemen.

11.4 CONCLUSIES

Verschillende factoren kunnen lokaal bijdragen leveren aan het toenemen van de plaathoogte, waarbij de bijdrage van het ene of het andere proces per plaat zal verschillen.

12

Drempels en de vorming van kortsluitgeulen

12.1 AANLEIDING

In eerdere studies (o.a. Cleveringa, 2007) is vastgesteld dat het aantal kortsluitgeulen door de platen is afgenomen. Door de Middelpaalt in macrocel 3 lopen nog enkele kortsluitgeulen en de Rug van Baarland en de Molenplaat worden van elkaar gescheiden door een kortsluitgeul. Ook het aantal gebieden met actieve drempelgeulen is afgenomen. Tegenwoordig zijn er nog twee drempelgebieden met dynamische drempelgeulen, het gebied rond de Schaar van Spijkerplaat in macrocel 1 en de drempel van de Everingen op de grens van macrocellen 3 en 4. Ter illustratie hiervan zijn in figuur 12.1 kaarten opgenomen van de Westerschelde in 1931 en 2010 met een indicatie van de kortsluit- en drempelgeulen.

In de kortsluitgeulen heeft sedimentatie plaatsgevonden, zoals is getoond in het LTV V&T-rapport K-16. Het opvullen van de kortsluitgeulen hoeft niet noodzakelijkerwijs te betekenen dat er minder kortsluitgeulen overblijven, als

maar voldoende nieuwe kortsluitgeulen ontstaan. In het verleden was sprake van een dynamiek waarbij kortsluitgeulen ontstonden, verplaatsten en weer verdwenen (Jeuken, 2000). Tegenwoordig lijken geen nieuwe kortsluitgeulen meer te ontstaan. En dat betekent dat steeds minder kortsluitgeulen overblijven.

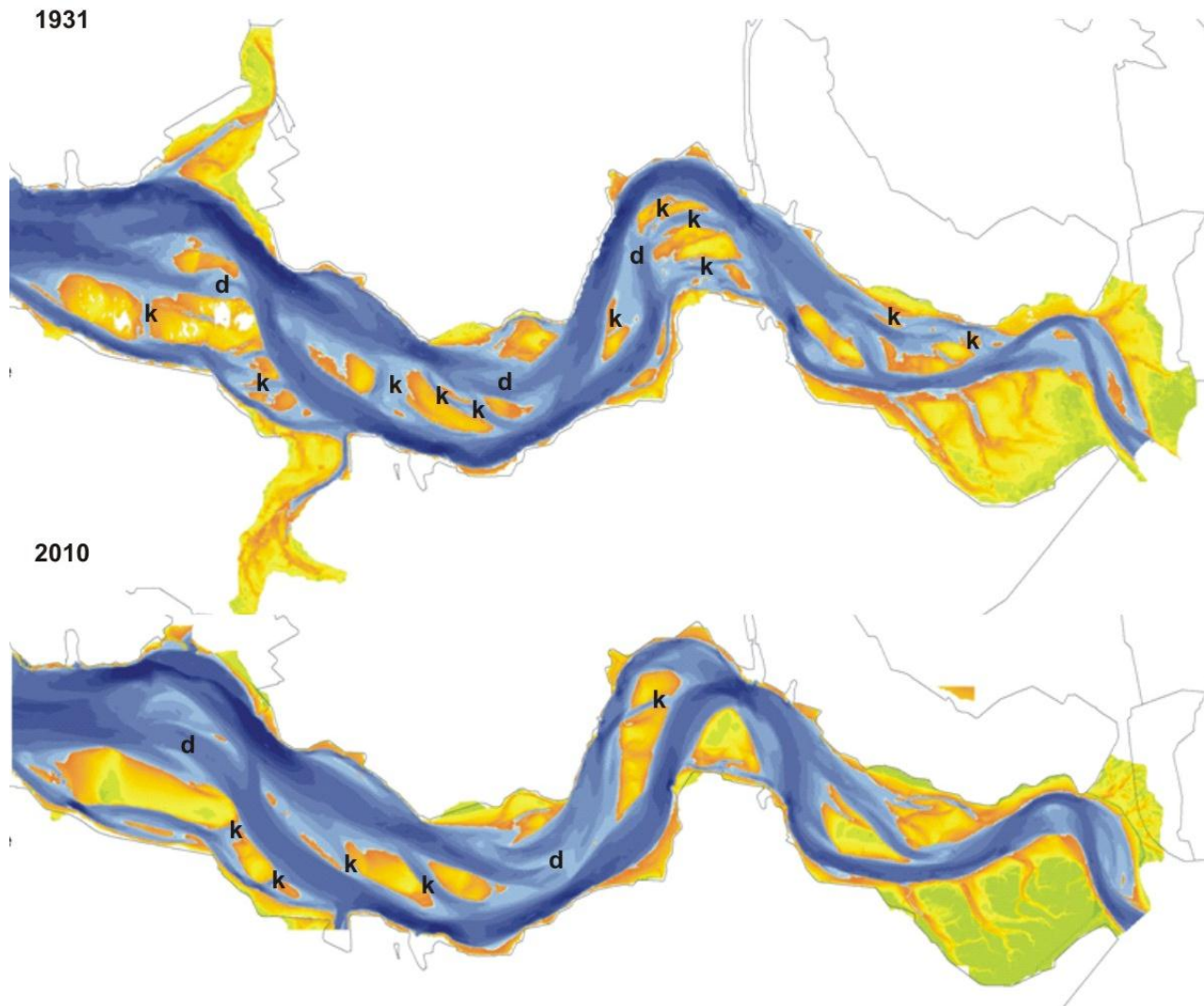
12.2 ONTSTAAN VAN KORTSLUITGEULEN

Nieuwe kortsluitgeulen ontstaan mogelijk op de drempelgebieden (Van den Berg e.a., 1996). Dit is waarschijnlijk gekoppeld aan de dynamiek van deze drempelgebieden. In figuur 12.2 is het conceptuele model weergegeven voor het ontstaan van kortsluitgeulen op de drempels:

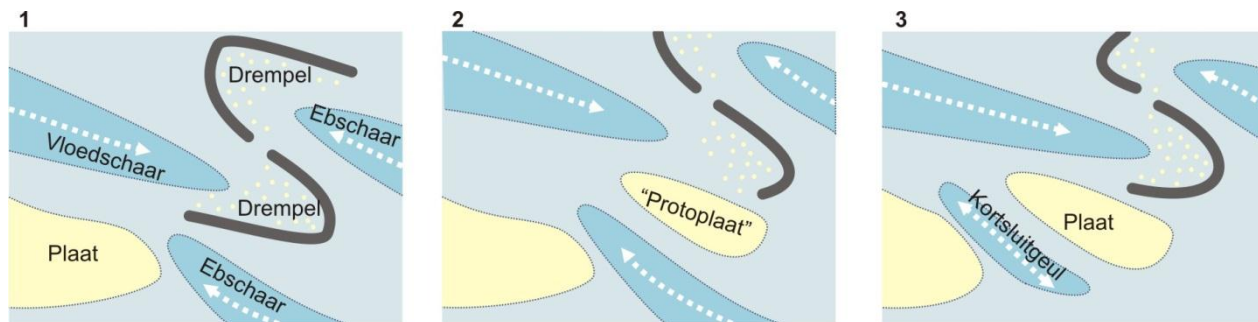
1. Op de drempels ontstaan (kleine) en- en vloedscharen met de bijbehorende ondieptes.
2. Deze ondieptes, tussen of aan het uiteinde van de geulen, ontwikkelen soms tot kleine “protoplaten”, waarbij tussen plaat en plaalement een geul ingeklemd raakt.
3. Als de geul in stand kan blijven en niet wordt opgevuld met het sediment van de plaat, dan ontstaat een nieuwe kortsluitgeul, met aan beide zijden een plaat.

Figuur 12.3 toont in drie kaarten het tijdelijke ontstaan van een kleine plaat en kortsluitgeul bij de oostelijke Middelpaalt in de periode van 1994 tot en met 2010. Deze ontwikkeling verloopt volgens de hiervoor geschetste stappen, maar het uiteindelijke resultaat is geen stabiele kortsluitgeul. De omvang van de kortsluitgeul neemt af en de nieuwe plaat verheelt met de bestaande oostelijke Middelpaalt.

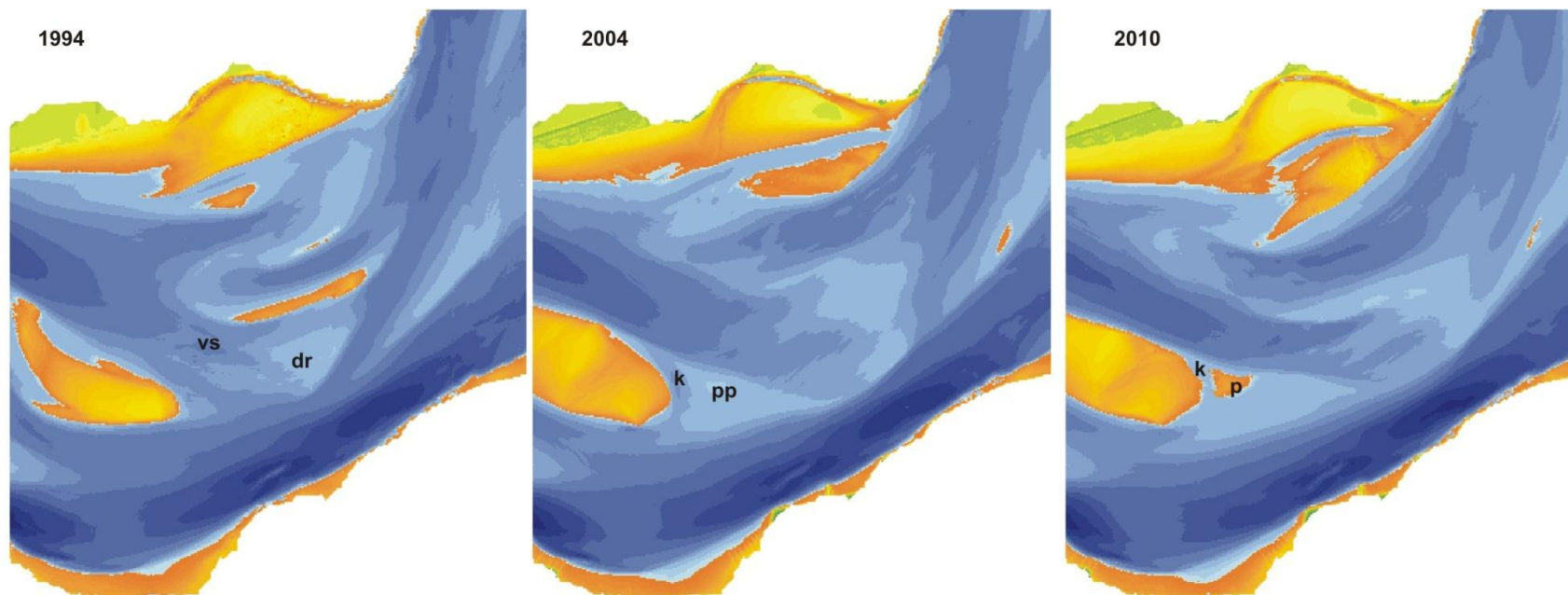
Het blijkt lastig om voorbeelden te vinden van het succesvol ontstaan van kortsluitgeulen in de digitaal beschikbare bodembestanden vanaf 1955. Blijkbaar dateren de kortsluitgeulen van voor 1955 en overheerst inderdaad het opvullen en verdwijnen er van.



Figuur 12.1 De Westerschelde in 1931 (boven) en 2010 (onder) met de drempelgebieden (d) en kortsluitgeulen (k).



Figuur 12.2 Model voor het ontstaan van kortsluitgeulen door de platen op de drempels.



Figuur 12.3 Voorbeeld van de ontwikkeling van een plaat (p) en tijdelijke kortsluitgeul (k), uit een vloedschaar (vs) en drempel (dr), met een "protoplaat" (pp) bij de oostzijde van de Middelpaalt.

Een mogelijke verklaring voor de beperkte nieuwvorming van kortsluitgeulen is de afname van het aantal drempelgebieden waar deze ontwikkeling mogelijk is. Zoals al eerder is aangegeven en in figuur 12.1 is gemarkeerd, zijn er nog twee gebieden met dynamische drempelgeulen. Bij de Schaar van Spijkerplaat is een drempelgebied aanwezig en is sprake van veel dynamiek van scharen en ondieptes. Maar van een relatief stabiele plaat is in dit gebied geen sprake, zodat geen kortsluitgeulen door de platen mogelijk zijn. Verder is alleen op de in figuur 12.3 getoonde drempel van de Everingen sprake van dynamiek van de drempelgeulen.

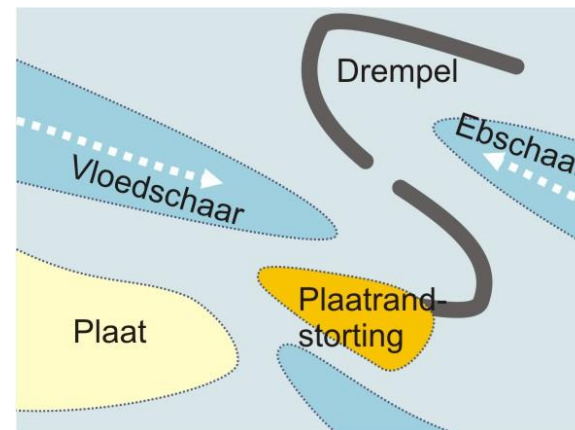
Swinkels e.a. (2009) geven veranderingen in het verhang tussen hoofd- en nevengeul als een verklaring voor de afname van de kortsluitgeulen in de Westerschelde. Dit kan een verklaring zijn voor het verdwijnen van nieuwgevormde nevengeulen, zoals getoond in figuur 12.3. De door Swinkels e.a. (2009) en hier beschreven modellen zijn complementair.

12.3 BEHEERMAATREGELEN?

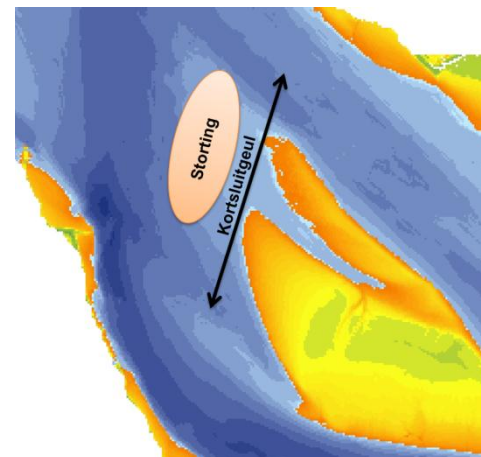
Het in figuur 12.2 getoonde model voor de vorming van kortsluitgeulen kan mogelijk worden nagebootst door stortingen in de nabijheid van plaatcomplexen dusdanig aan te brengen dat tussen de oorspronkelijke plaat en de storting een geul aanwezig is. Mogelijk kunnen toekomstig uit te voeren plaatrandstortingen zo worden uitgevoerd dat ook dit nevengeul kan worden gediend. In figuur 12.4 is dit schematische weergegeven.

Een dergelijk storting verandert niets aan de aandrijvende kracht voor de instandhouding van de kortsluitgeulen, zoals beschreven in Swinkels e.a. (2009). Het is daarom lastig om een uitspraak te doen over de verwachte levensduur van een dergelijke kortsluitgeul.

Een voorbeeld van een locatie die in potentie geschikt is voor de aanleg van een storting met tussengelegen kortsluitgeul is de westzijde van de Plaat van Walsoorden (figuur 12.5).



Figuur 12.4 Schematische weergave van een plaatrandstorting gericht op het creëren van een kortsluitgeul.



Figuur 12.5 Mogelijke kansrijke locatie voor het uitvoeren van een plaatrandstorting met tussengelegen kortsluitgeul.

13

Geulen in hun nadagen

13.1 AANLEIDING

De laatste 'stuiptrekking' van een geul die vlak onder de oever ligt is vaak een (lokale) verdieping. Die verdieping kan vervelende gevolgen hebben voor de stabiliteit van de oever, wat een reden kan zijn voor het uitvoeren van beschermingswerken. Vaak is de volgende stap in de ontwikkeling dat de geul wordt opgevuld en verdwijnt. De bedreiging voor de waarden (dijk, voorland, slik en schor) aan de landzijde is dan weer verdwenen. Voor kostenefficiënt beheer lijkt het verstandig om bij het zoeken naar oplossingen voor de kortstondige bedreigingen rekening te houden met de toekomstige ontwikkelingen. In dit hoofdstuk worden twee voorbeelden getoond en worden mogelijke maatregelen benoemd.

13.2 GEUL VAN BAARLAND

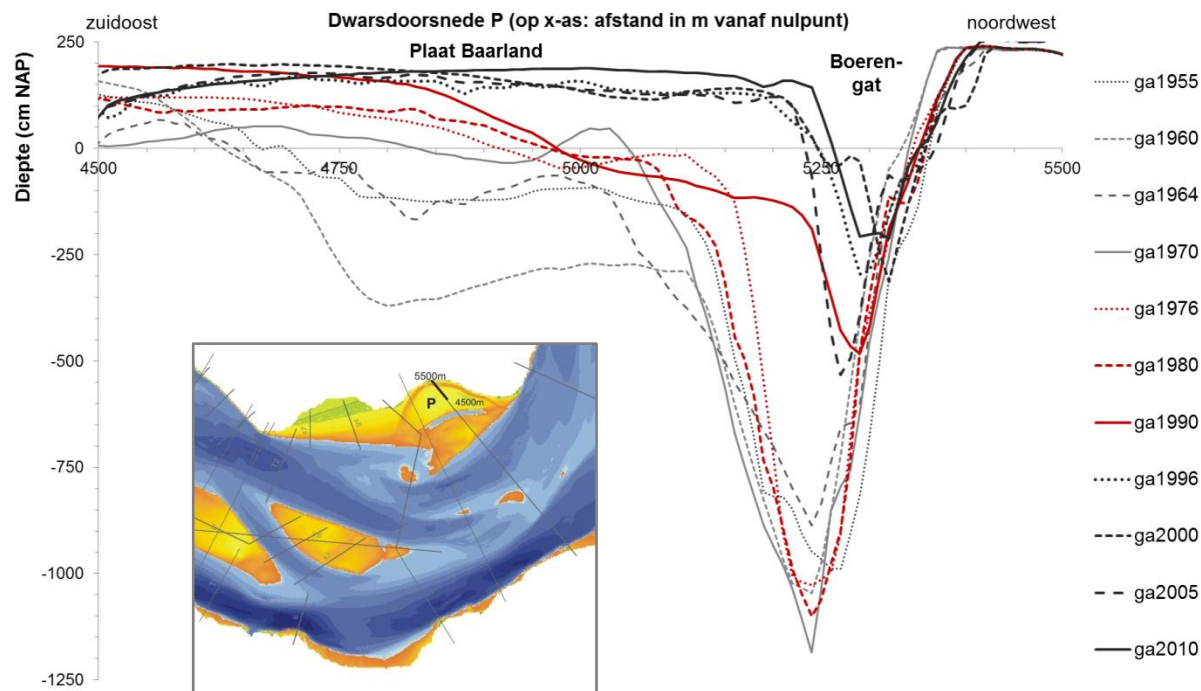
Een voorbeeld waar een bescherming van het schor is uitgevoerd, is bij het Schor van Baarland, tegen het opdringen van de geul Boerengat (figuur 10.1).



Figuur 13.1 Dwarsdammen voor het Schor van Baarland.

In het bovenaanzicht is te zien dat hier ten minste vier hamer- of aambeeldvormige stenen dammen zijn aangelegd. Deze dammen hadden tot doel om de verdere achteruitgang van het schor tegen te gaan.

In de dwarsdoorsneden in figuur 13.2 is te zien dat deze geul een autonome afname van de omvang had. Na een toename van de maximale waterdiepte (in de jaren '70) is deze afgenomen tot minder dan NAP -2,5 m in 2010. Ook de breedte van de geul is sterk afgenomen.



Figuur 13.2 Dwarsdoorsnede P door de Plaat van Baarland en het Boerengat (locatie in inzet).

13.3 GEUL ZIMMERMAN

De Geul Zimmerman in macrocel 5 is een geul waarvan de omvang al ten minste 20 jaar gestaag afneemt (LTV V&T-rapport K-16). De geul ligt tussen de Plaat van Valkenisse en de noordoever van de Westerschelde. Tegenwoordig zijn de slikken en de plaat verbonden door een droogvallende ondiepte. De ontwikkeling van de geul is in een dwarsdoorsnede getoond in figuur 13.3. In de

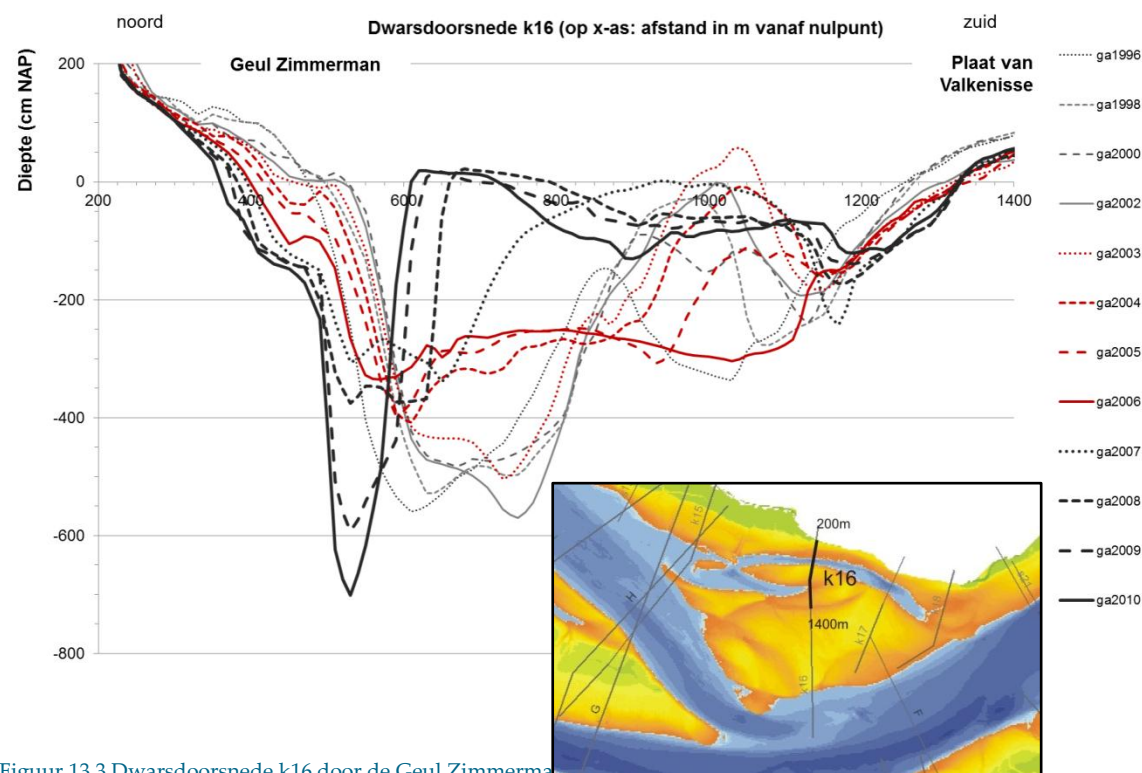
dwarsdoorsnede is zichtbaar dat de geul ter plaatse van deze dwarsdoorsnede in het verleden breder was en over deze gehele breedte relatief diep. Momenteel ligt het diepste deel van de geul dicht onder de oever. De noordelijke flank en de zuidelijke flank van de geul zijn naar de oever gemigreerd. In combinatie met de verondieping aan de zuidzijde van geul, heeft de ontwikkeling er toe geleid dat de plaat op 400 m van de noordoever ligt. Het slik is ter plaatse flink lager geworden.

Overigens is deze situatie niet representatief voor de gehele Geul Zimmerman, de sterke verdiepingen doen zich lokaal voor.

Hoewel de geschetste situatie bij de Geul Zimmerman nog geen aanleiding is geweest om over te gaan op ingrepen, is het goed voorstelbaar dat een verdere verplaatsing en of versteiling van de geulwand onwenselijk is.

13.4 BEHEERMAATREGELEN

Klassieke beschermingsmaatregelen bij een steile en eroderende geulwand bestaan uit het uitvoeren van steenbestortingen of de aanleg van strekdammen die de geul uit de oever moeten houden (zie het voorbeeld in figuur 13.1). Deze maatregelen zijn lokaal heel effectief, maar houden geen rekening met de verwachte toekomstige ontwikkelingen. Het gevolg daarvan kan zijn, zoals nu bij Baarland het geval is, dat de (dure) beschermingsmaatregelen in het sediment komen te liggen.



Figuur 13.3 Dwarsdoorsnede k16 door de Geul Zimmerman (van noord naar zuid)

Beheermaatregelen die anticiperen op de toekomstige verbetering van de situatie zijn in dergelijke gevallen het overwegen waard. Een mogelijke maatregel is het opvullen van de geul met sediment, vooruitlopend op de autonome ontwikkeling. Een alternatief voor het geheel opvullen met sediment is het aanbrengen van een zandige buffer aan de zijde die de bedreiging oplevert. De geulwandsuppleties bij het Oostgat, aan de zuidwestkust van Walcheren, hebben

de kennis opgeleverd dat een zandige buffer voor een steil geulprofiel een effectieve beschermingsmaatregel kan zijn. Mogelijk kan bij het uitvoeren van dergelijke werken gebruik worden gemaakt van baggerspecie die in de omgeving beschikbaar komt. Afhankelijk van de wens en noodzaak kan het ontwerp zo worden gemaakt dat ecologisch gewenst (laagdynamisch, ondiep) habitat wordt gecreëerd.

14

Veranderingen in de geometrie van de plaatcomplexen en de toename van het hoogdynamische areaal

14.1 INLEIDING

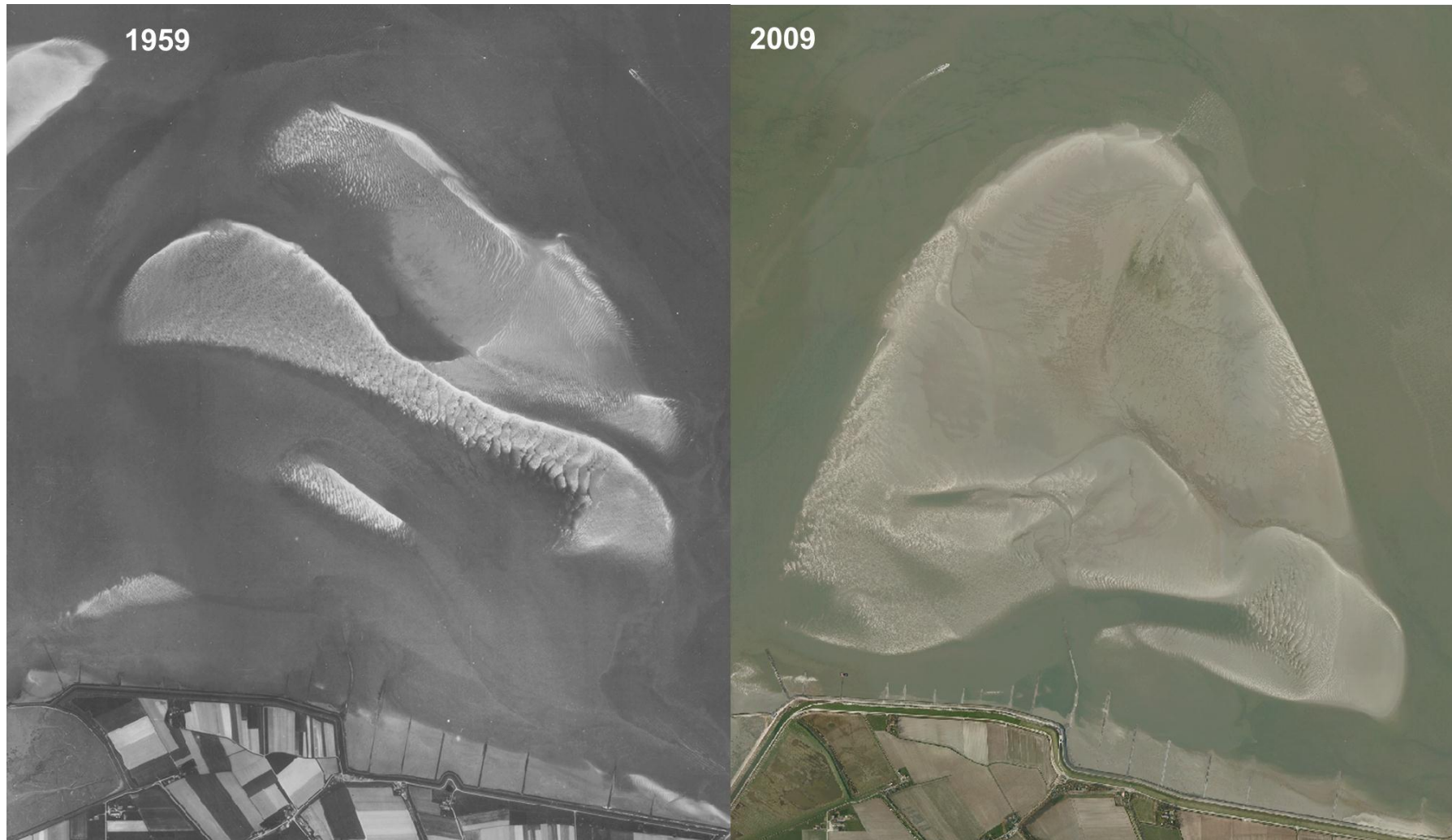
Op basis van de ecotopenkaarten is voor de Westerschelde vastgesteld dat het areaal hoogdynamische plaat is toegenomen en het areaal laagdynamische plaat is afgenomen (van Eck & Holzhauer, 2007; Cleveringa, 2007). Hoogdynamisch litoraal areaal biedt minder goede leefomstandigheden voor bodemleven, dat daarom slecht in lage dichtheden en met een beperkte biomassa aanwezig is in dergelijke gebieden. Laagdynamisch litoraal areaal biedt goede leefomstandigheden en biedt daarom ruimte aan veel bodemleven (grote dichtheden en hoge biomassa's (Bouma e.a., 2005). De aanwezigheid van het bodemleven wordt gecorreleerd aan de bewegelijkheid van de bodem, door de

optredende sedimenttransporten en de verplaatsing van (mega)ribbels, wordt gesproken over dynamiek. Via het sedimenttransport en de aan- of afwezigheid van (mega)ribbels is dynamiek gekoppeld aan het optreden van bepaalde stroomsnelheden gedurende een bepaalde periode (Ysebaert e.a., 2012). De toename van het hoogdynamische areaal en de afname van het laagdynamisch areaal wordt verondersteld te betekenen dat de stroomsnelheden op het litoraal zijn toegenomen. Omgekeerd wordt verondersteld dat laagdynamisch areaal kan worden gecreëerd door de stroomsnelheden ter plaatse te beperken (zie bijvoorbeeld Nolte e.a, 2011).

De veronderstelling is daarom dat de toename van het areaal laagdynamisch en de afname van het areaal hoogdynamisch het gevolg is van de toename van de stroomsnelheden in het litoraal. De vraag achter de verandering van de dynamiek wordt daarmee de vraag waarom de stroomsnelheden in het litoraal zijn toegenomen.

Eenvoudige verklaringen voor een toename van de stroomsnelheden op de platen zijn niet voorhanden. De meeste plaatcomplexen zijn gemiddeld hoger geworden, ook ten opzichte van veranderde waterstanden. Bij een plaat die hoger in het getijdenvenster komt te liggen neemt de gemiddelde waterdiepte af. Bij kleinere waterdiepten passe lagere stroomsnelheden. Het verschuiven van de fase van het getij, zodat de periode met hogere stroomsnelheden meer samenvallen met de periode waarbij de platen onder water staan biedt geen verklaring voor het optreden van deze verandering in dynamiek in de gehele Westerschelde.

In dit hoofdstuk wordt een complexe verklaring gezocht voor de toename van de stroomsnelheden op de platen. Een ontwikkeling die parallel op is getreden met de toename van het areaal hoogdynamische plaat is de afname van het aantal plaat-elementen per plaatcomplex. Met het verdwijnen van de tussenliggende kortsluitgeulen zijn de kleine platen meer en meer aaneengegroeid tot grote aaneengesloten platen (figuur 14.1).



Figuur 14.1 Platencomplex van Ossenisse (oost) in 1959 en de Plaat van Ossenisse in 2009
(bron: Geoloket Provincie Zeeland)

Net als bij de toename van de hoogte van de platen (in hoofdstuk 11) is het verleidelijk om een verband te leggen tussen de toename van de stroomsnelheden en het aaneengroeien van de plaatcomplexen. Het samen optreden van de veranderingen betekent niet noodzakelijkerwijs dat een causaal verband bestaat. Het causale verband wordt plausibeler gemaakt met een eenvoudig geometrisch model van de platen dat in dit hoofdstuk wordt beschreven en dat de toename van de stroomsnelheden op de platen verklaart.

14.2 SCHEMATISATIE PLAAT

De complexe geometrie van een plaat (figuur 14.1) terug gebracht naar een cirkel met een straal r (figuur 14.2). De waterhoogte boven de plaat bij hoogwater is h . Deze schematisatie is ontleend aan de berekening van de sedimentatiesnelheid in een (zandwin)put op het wad (Oost e..a, 1998).

Deze schematisatie levert onderstaande kenmerken van de plaat:

Areaal: $O = \pi r^2$

Kombergingsvolume: $P = h \times O = h \times \pi r^2$

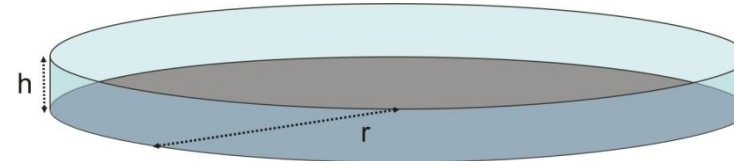
Aanstroomoppervlakte: $A = h \times 2\pi r$

De volgende aanname is dat de stroomsnelheden op de plaat worden bepaald door de kenmerken van de plaat en niet door de stroomsnelheden in de aanliggende geulen. De gemiddelde stroomsnelheid van, dan wel naar, de plaat wordt evenredig verondersteld met het volume P dat door aanstroomoppervlak A stroomt:

Aanstroom- en Afstroomsnelheid $\bar{u} \cong \left[\frac{P}{A} \right] / t$

Met t het tijdsbestek voor aan- dan wel afstromen

Een plaatcomplex wordt geschematiseerd door een verzameling platen, die allemaal dezelfde straal r_{klein} hebben.



Figuur 14.2 Geschematiseerde plaat met straal r en waterhoogte h .

Deze schematisatie, waarbij een plaatcomplex bestaat uit een of meerdere cirkelvormige platen met een cirkel r , doet voldoende (zie hieronder) recht aan de complexe geometrie van de platen. In figuur 14.3 is op de y-as de oppervlakte/omtrek, oftewel de aanstroomoppervlakte A van de verschillende plaatcomplexen in de Westerschelde uitgezet. In deze figuur is met 1 het beginpunt en met 2 het eindpunt aangeven van de ontwikkeling van de aanstroomoppervlakte van de Hooge Platen. Het begin van de Platen van Ossensisse is aangegeven met 3 en het eindpunt met 4.

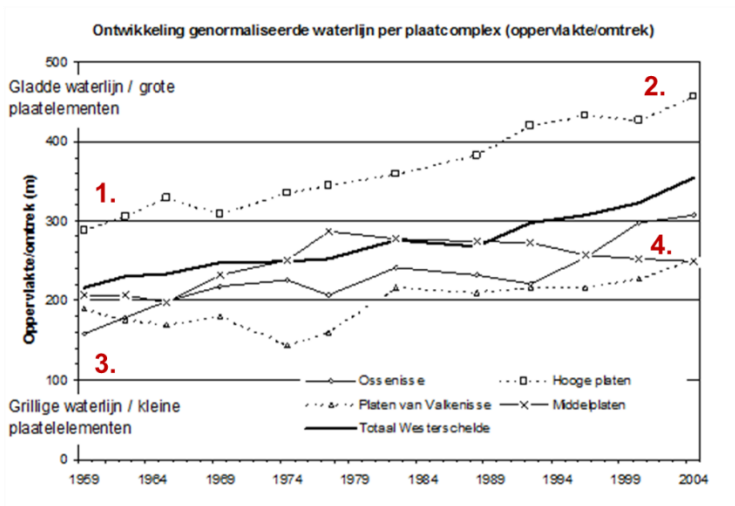
Hooge Platen

Beginpunt 1: A (oppervlakte/omtrek) = 313 m^2 kan worden vertegenwoordigd door bestaat uit twee platen met identiek oppervlak met straal $r = 626 \text{ m}$;
Eindpunt 2: A (oppervlakte/omtrek) = 443 m^2 kan worden vertegenwoordigd door één plaat met een straal: $r = 885 \text{ m}$;

Platen van Ossensisse.

Beginpunt 3: A (oppervlakte/omtrek) = 185 m^2 kan worden vertegenwoordigd door bestaat uit twee platen met identiek oppervlak met straal $r = 375 \text{ m}$;
Eindpunt 4: A (oppervlakte/omtrek) = 275 m^2 kan worden vertegenwoordigd door één plaat met een straal: $r = 550 \text{ m}$;

Deze schematisatie van de plaatcomplexen doet inderdaad voldoende recht aan de veranderingen in de aanstroomoppervlakte. De totale oppervlakte van de complexen wordt met deze schematisatie onderschat. Voor het berekenen van de verschillen in aanstroming door de verandering in geometrie is deze benadering daarom voldoende.



Figuur 14.3 Grafiek met de aanstroomoppervlakte A (= oppervlakte / omtrek) in de tijd voor de verschillende plaatcomplexen (uit Cleveringa, 2007).t

14.3 VAN TWEE KLEINE PLATEN NAAR ÉÉN GROTE PLAAT

De ontwikkeling van de geometrie van de plaatcomplexen wordt voorgesteld als de ontwikkeling van twee kleine platen (aangeduid met klein) naar één grote plaat (aangeduid met groot). De totale oppervlakte van de twee kleine platen is hetzelfde als de oppervlakte van de grote plaat.

Voor de twee platen geldt:

Areaal	$O_{klein} = 2 \times \pi r_{klein}^2$
Kombergingsvolume	$P_{klein} = 2 \times h \times O_{klein} = 2 \times h \times \pi r_{klein}^2$
Aanstroomoppervlakte	$A_{klein} = 2 \times h \times 2\pi r_{klein}$

Voor een grote plaat geldt:

Areaal	$O_{groot} = \pi r_{groot}^2$
Kombergingsvolume	$P_{groot} = h \times O_{groot} = h \times \pi r_{groot}^2$
Aanstroomoppervlakte	$A_{groot} = h \times 2\pi r_{groot}$

Met een gelijk oppervlakte en kombergingsvolume voor beide situaties geldt dan:

$$O_{klein} = O_{groot} \rightarrow 2 \times r_{klein}^2 = r_{groot}^2 \rightarrow r_{groot} = \sqrt{2} r_{klein}$$

De aanstroomoppervlakte van de grote plaat laat zich daarmee schrijven als:

$$A_{groot} = h \times 2\pi(\sqrt{2} r_{klein}) = h \times \left[\frac{1}{\sqrt{2}} \right] \times A_{klein}$$

Dus het aanstroomoppervlakte van één grote plaat is gelijk aan $\frac{1}{\sqrt{2}}$ maal de aanstroomoppervlakte van twee kleine platen.

Met de relatie voor de aanstroom- en afstroomsnelheid geldt dan:

Voor één grote [plaat]:

$$\overline{u}_{groot} \cong \left[\frac{P}{A_{groot}} \right] / t$$

Voor twee kleinere platen:

$$\overline{u}_{klein} \cong \left[\frac{P}{A_{klein}} \right] / t \cong \sqrt{2} \left[\frac{P}{A_{groot}} \right] / t$$

Het voorbeeld hierboven is uitgewerkt voor de overgang van twee naar een plaat, maar kan eenvoudig worden veralgemeniseerd voor overgangen van n platen naar één grote plaat:

$$\bar{u}_B \cong \sqrt{n} \left[\frac{P}{A_A} \right] / t$$

De verandering in de gemiddelde stroomsnelheid op en van de platen bij de hierboven beschreven verandering van twee naar één plaat is dus evenredig met $\sqrt{2}$ en bij een overgang van n platen naar 1 plaat is deze \sqrt{n} .

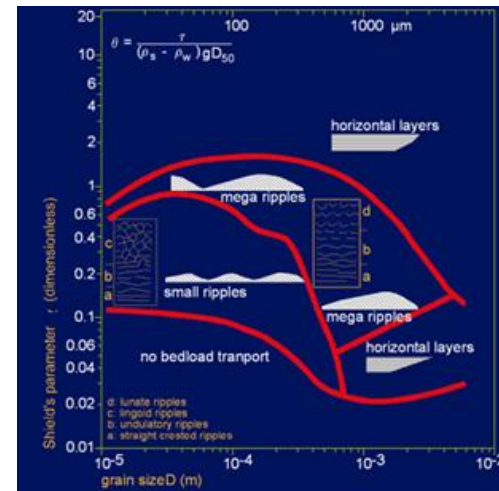
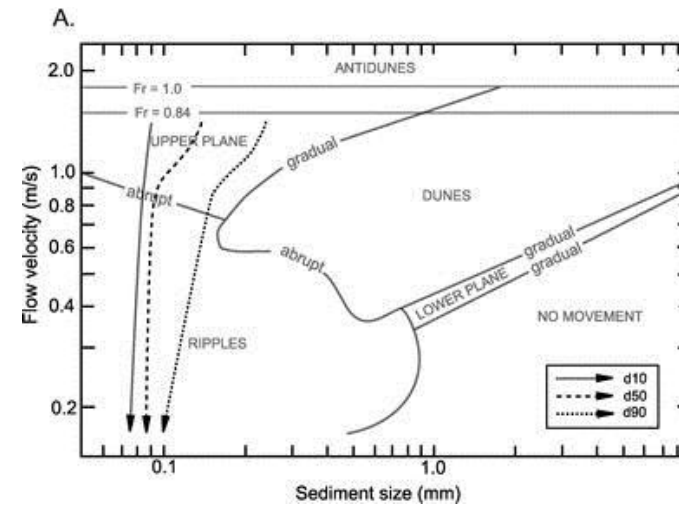
14.4 DISCUSSIE

Het uitgangspunt aan het begin van dit hoofdstuk is dat de toename van hoogdynamisch litoraal ten koste van het laagdynamische litoraal terug te brengen is tot een toename van de stroomsnelheden in het litoraal. Bij dit uitgangspunt moeten enkele kanttekeningen worden geplaatst.

De dynamiek is gekoppeld aan de aan- of afwezigheid van bodemdieren. Ook andere factoren dan de aanwezigheid en dynamiek van (mega)ribbels en het sedimenttransport kunnen de aanwezigheid van bodemleven beperken. Het optreden van relatief veel golfwerking wordt bij het westen van de Hooge Platen verondersteld beperkend te zijn voor het bodemleven (persoonlijk communicatie Dick de Jong).

Het sedimenttransport en de ribbels op de plaat- en slikbodem zijn niet alleen afhankelijk van de optredende stroomsnelheden, maar ook van de korrelgrootte, zoals aangegeven in het bovenste stabiliteitsdiagram in figuur 14.4. In dit stabiliteitsdiagram staan de structuren op de bodem (kleine ribbels, megaribbels, vlakke bodem) aangegeven, zoals die optreden bij verschillende combinaties van korrelgrootte (x-as) en stroomsnelheid (y-as).

In het rechter diagram staat op de y-as niet de stroomsnelheid, maar de Shields parameter. Daarin zit de bodemschuifspanning, die weer afhankelijk is van verschillende factoren, zoals de stroomsnelheid en daarmee ook de waterdiepte.



Figuur 14.4 Twee voorbeelden van stabiliteitsdiagrammen voor structuren op de bodem (boven uit Sumner e.a., 2008; onder van <http://www.geo.uu.nl/fg/berendsen/teaching>)

Omdat de omstandigheden in het litoraal voortdurend veranderen, vanwege de variabele waterstand, variabele stroomsnelheden en de wisseling van stroomrichting tijdens en eb- en vloed is het in ieder geval lastig om te duiden onder welke omstandigheden representatieve stroomsnelheden optreden.

Door Baas (1993) is aangetoond dat bij de vorming van ribbels ook de factor tijd een rol speelt. Bij een langdurige blootstelling aan lage stroomsnelheden verandert de vorm van kleine ribbels in een vorm die normaal bij hoge stroomsnelheden past. Ook is vastgesteld dat aanwezigheid van bodemleven een rol speelt bij de stabiliteit van bodemstructuren (zie bijvoorbeeld het klassieke experiment in de Oosterschelde, dat is beschreven in Vos e.a., 1988).

14.5 CONCLUSIE

Het uitgangspunt dat de verandering van laag- naar hoogdynamisch terug is te brengen op een verandering in de stroomsnelheden is mogelijk een te eenvoudige weergave van de werkelijkheid. Verschillende andere factoren hebben waarschijnlijk een ook bijdragen geleverd aan de veranderingen in de sedimentdynamiek.

Het meer aaneengesloten worden van de platen kan leiden tot het toenemen van de gemiddelde stroomsnelheden op de platen. De relatieve afname van de aanstroomoppervlakte leidt tot een toename van de aan- en afstroomsnelheden.. Tenminste een deel van de toename van het hoogdynamische litoraal en afname van het laagdynamisch areaal kan het gevolg zijn van de afname van de complexiteit van de platen.

15

Fysische betekenis van droogvalduur- percentages

15.1 INLEIDING

In het Schelde-estuarium zijn zowel de bodemligging als de niveaus van hoog- en laagwater veranderd. Ter illustratie is in figuur 15.1 een grafiek opgenomen waarin zowel de waterstanden in Terneuzen als bodemligging van de Middelpaten zijn weergegeven voor 1955 en 2010. De hoogwaterstanden zijn in 2010 hoger dan in 1955 en de gemiddelde plaathoogte is ook toegenomen.

Met de veranderingen van het niveau van hoog- en laagwater zijn ook de grensniveaus voor het sublitoraal en het supra-litoraal opgeschoven. Bij het bepalen van de arealen van de habitats moet daar rekening mee worden gehouden. Dat kan door te werken met referentieniveaus die in ruimte en tijd veranderen. Voor het litoraal wordt gewerkt met droogval- percentages, die voor het hele gebied van laag- tot hoogwater beschrijven hoe lang de gebieden droogliggen. Het sublitoraal heeft droogvalpercentages van 0% en het

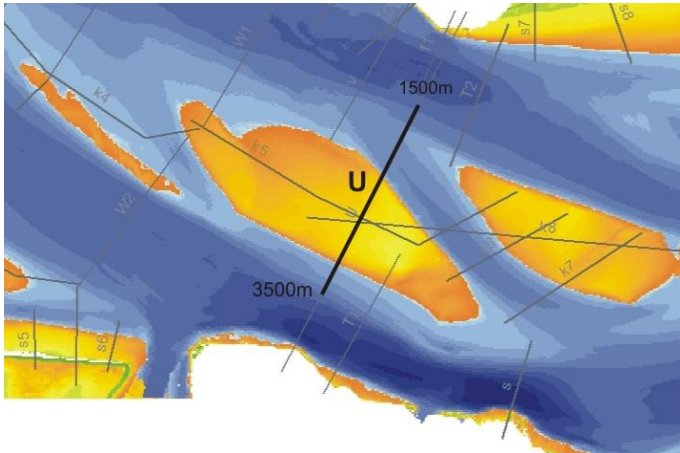
supralitoraal heeft droogvalpercentages van 100%. Voor iedere opname moeten de droogvalpercentages apart worden berekend.

Droogvalpercentages worden onder andere gebruikt in de ecotopenkaarten. In dit hoofdstuk wordt toegelicht dat het gelijk blijven van droogvalpercentages niet hoeft te betekenen dat de fysische omstandigheden hetzelfde blijven.

15.2 FYSISCH VERSCHILLEN

In figuur 15.3 staat een geschematiseerde dwarsdoorsnede die illustreert dat bij een gelijkblijvend areaal met dezelfde droogvalpercentages de fysische condities niet hetzelfde hoeven zijn. In de bovenste dwarsdoorsnede is sprake van een relatief flauw profiel in het litoraal, met een beperkte getijslag. In de onderste dwarsdoorsnede is het profiel steiler, maar de waterstandsverschillen zijn zo toegenomen dat dit de steilere helling 'te niet doet'. Het totale areaal van het litoraal is in beide dwarsdoorsnedes gelijk.

De omstandigheden op de plaat en in het sediment zijn bij een steil profiel anders dan bij het flauwe profiel. Bij hoogwater is bijvoorbeeld de hoogte van de waterkolom boven het steile profiel groter dan bij het flauwe profiel. Daarmee is het waarschijnlijk dat ook de stroomsnelheden bij het steile profiel anders zijn. Deze zijn immers medeafhankelijk van de diepte. Bij laagwater is bij een steil profiel het verhang tussen het grondwater en de geul groter. Afhankelijk van de doorlatendheid van het sediment kan daardoor bij een steil profiel de top van het sediment meer uitdrogen dan bij een flauw profiel.



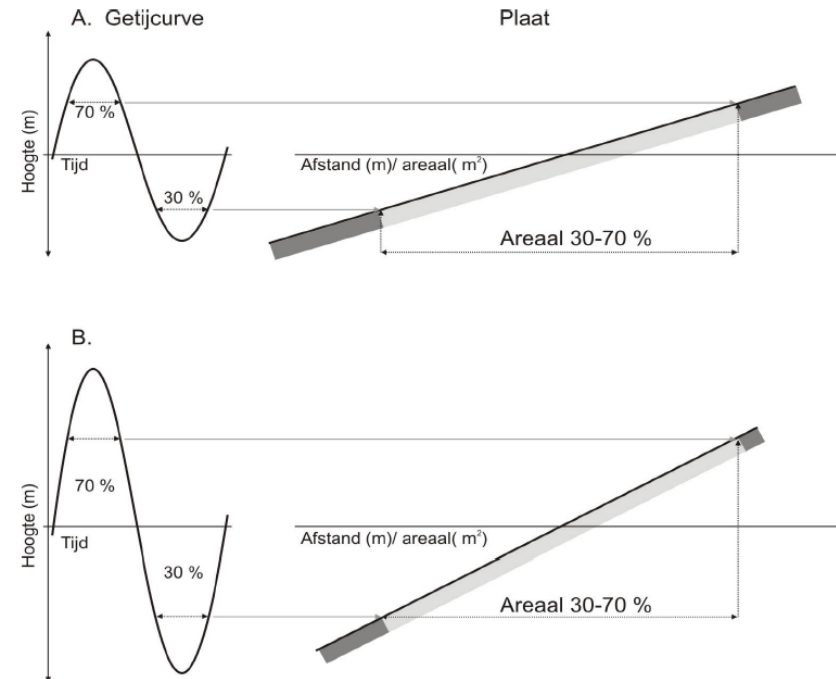
Figuur 15.2 Locatie van de dwarsdoorsnede U door de Middelpaalt (macrocel 4).

De hierboven beschreven fysische verschillen hebben waarschijnlijk consequenties voor het bodemleven in en op het sediment. Bij dezelfde droogvalpercentages zijn de verschillen in de condities die optreden bij hoog- en laagwater extremer naarmate het profiel steiler is. De extreme condities kunnen doorwerken in de aanwezigheid van soorten, in de dichtheden en in de individuele kwaliteit. Dit kan weer doorwerken in de soorten die foerageren op de bodemdieren.

15.3 CONCLUSIES

Bij het beschouwen van droogvalpercentages, of daarvan afgeleide waarden (bijvoorbeeld het laag, midden en hooggelegen litoraal uit de ecotopenkaarten), moet in het achterhoofd worden gehouden dat een gelijkblijvend droogvalpercentage niet betekent dat de fysische omstandigheden hetzelfde blijven. De fysische veranderingen die kunnen optreden bij een gelijkblijvend

areaal hebben mogelijk ook gevolgen voor bodemdieren en daarop foeragerende dieren.



Figuur 15.3 Voorbeeld van vergelijkbaar areaal droogvallende plaat bij kleine getijslag en flauwe plaat (A) en grote getijslag en steile plaat (B) (uit Alkyon, A1774, 2006).

16

Referenties

Alle referenties uit het LTV V&T project zijn onderaan de referenties weergegeven.

Alkyon (2006) Plaatmorfologie Westerschelde; Veranderingen in de plaatmorfologie van de Westerschelde en de gevolgen voor het steltloperhabitat. Alkyon rapport A1774R1r2.

Baas, J. H., Oost, A. P., Sztano, O. K., de Boer, P. L. and Postma, G. (1993). Time as an independent variable for current ripples developing towards linguoid equilibrium morphology. *Terra Nova*, 5: 29–35.

Bakker, W.Th.J.N.P.; de Looff, D. (1977). Onderzoek naar de mogelijkheden tot en de gevolgen van zandwinning in de Westerschelde. Notitie WWKZ, 77.V004. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Rijkswaterstaat. Directie Waterhuishouding en Waterbeweging: Vlissingen. 48 + bijlagen pp.

Bouma, H., D.J. de Jong, F. Twisk & F. Wolfstein (2005) K. Zoute wateren EcotopenStelsel (ZES.1) Voor het in kaart brengen van het potentiële voorkomen van levensgemeenschappen in zoute en brakke rijkswateren. Rapport RIKZ/2005.024.

Cleveringa, J.(2007) Achtergronddocument ontwikkeling Westerschelde; Fenomenologisch onderzoek naar de ontwikkelingen op mesoschaal; bij

Morfologische Milieueffectrapport Verruiming vaargeul Beneden-Zeeschelde en Westerschelde; Consortium Arcadis Technum.

Cleveringa, J. R. C. Steijn, & J. Geurts van Kessel (2007). Time-scales of morphological change of the former ebb-tidal deltas of the Haringvliet and Grevelingen (The Netherlands). Proceedings of the 5th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Enschede, NL, 17-21 September 2007, Edited by C. Marjolein Dohmen-Janssen and Suzanne J. M. H. Hulscher.

Coen, I. (1988). Ontstaan en ontwikkeling van de Westerschelde *Water* 7(43/1): 156-162.

Coen, I. (2008). De eeuwige Schelde? Ontstaan en ontwikkeling van de Schelde. Waterbouwkundig Laboratorium 1933 - 2008. Waterbouwkundig Laboratorium: Borgerhout. 112 pp.

Coen, L.; Peeters, P.; Mostaert, F. (2008). Inventarisatie en historische analyse Zeeschelde habitats: Effect antropogene ingrepen en natuurlijke evoluties op de getij-indringing in de Zeeschelde -Ondersteunende numerieke 1D-modellering. WL Rapporten, 713_21. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België.

Defra / Environment Agency. (2006). Review and formalisation of geomorphological concepts and approaches for estuaries R&D Technical Report FD2116/TR2.

De Kraker, A.M.J. (2002). De Westerschelde, een water zonder weerga: ontstaansgeschiedenis en kaartbeeld, havens, handel en scheepvaart, verkeer, verdronken dorpen, oorlog en verdedigingswerken, natuur en milieu en andere aspecten van de Westerschelde. Duerinck: Kloosterzande 228 pp.

De Vriend, H.J. (1991) Mathematical modelling and large-scale coastal behaviour, part 1: Physical processes, *Journal of Hydraulic Research* 19, p. 727-753.

Dillingh, D. (2006). Waterstanden Nederlandse kust en estuaria. Statistieken t.b.v. de hydraulische randvoorwaarden 2006. Rapport RIKZ-2006.012.

Eysink, W.D. & E.J. Biegel. (1992) Impact of sea level rise on the morphology of the Wadden Sea in the scope of its ecological function, Phase 2; Investigation on empirical morphological relations. WL | Delft Hydraulics report H1300.

Guns, P. (2008) Historische evolutie van het polderlandschap langs de linker Scheldeoever. Historische reeks Waterbouwkundig laboratorium 1933-2008.

Groot, T. (1960). De bevaarbaarheid van de Westerschelde voor schepen met grote diepgang. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Rijkswaterstaat. Directie Waterhuishouding en Waterbeweging: Vlissingen. 12 + bijlagen pp.

Hughes, S.A. (2002). Equilibrium Cross Sectional Area at Tidal Inlets, *Journal of Coastal Research* Vol. 18, No. 1 (Winter, 2002), pp. 160-174.

Huijs, S.W.E. (1995). Geomorfologische ontwikkeling van het intergetijdegebied in de Westerschelde 1935-1989. Universiteit Utrecht, IMAU.

Huijs, S.W.E.; Storm, C. (1997). Verlanding van de Westerschelde : verschillende wijzen om het begrip verlanding te kwalificeren. Werkdocument RIKZ, AB-97.813x. Ministerie van Verkeer en Waterstaat. Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Huitema, T. (1947) langs zee, rivieren en kanalen, Kaden om polders, droogmakerijen enz. Samenstelling . Aanleg . Onderhoud. Uitgevers-Maatschappij "Kosmos" Amsterdam-Antwerpen.

Ides, S.; Vanlede, J.; De Mulder, T.; Mostaert, F. (2008). Vervolgstudie inventarisatie en historische analyse van slikken en schorren langs de Zeeschelde – Gevoeligheidsonderzoek 2D modellen. WL Rapporten, 713_21. Waterbouwkundig Laboratorium, Antwerpen, België.

Kiden, P. (1995). Holocene relative sea-level change and crustal movement in the southwestern Netherlands Mar. Geol. 124: 21-41.

Krijger, G.M. (1993). Het Verdrongen Land van Saeftinge komt weer boven water. Werkdocument GWWS, 93,838x. MSc Thesis. Ministerie van Verkeer en Waterstaat, Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat (RWS) Dienst Getijdewateren (DGW)/RWS Waterdistrict Westerschelde.

Louters, T, en F. Gerritsen. (1994) Het mysterie van de wadden; Hoe een getijde systeem inspeelt op de zeespiegelstijging, Rijkswaterstaat RIKZ, rapport RIKZ-94.040, 69 pag.

Nolte, A.J. e.a. 2011. Natuurherstel in de Westerschelde: De mogelijkheden nader verkend. Deltares Hoofdrapport 1204087-000.

Postma, H. (1967): Sediment Transport and Sedimentation in the Estuarine Environment. In: *Estuaries*. Ed. Lauff, H. G., Washington D. C, p. 158-179.

Schlager, W. Accommodation and supply—a dual control on stratigraphic sequences. *Sedimentary Geology* Volume 86, Issues 1–2, July 1993, p. 111–136.

Sinke, O. (2011) Morfologische ontwikkelingen omgeving slikken bath 1955-2010. Rapport Deltares 1204402-000-ZKS-0012.

Stikvoort, E.C.; de Jong, D.J. (2003). Sedimentatiesnelheid op Westerschelde-schorren, 1998-2002. Werkdocument RIKZ, OS/2003.807X. RWS, RIKZ[s.l.]. 25 pp.

Storm, K. en T. Pieters (1994) Het verdrongen land verlandt; Het Verdrongen land van Saeftinge een uniek gebied nu en in de toekomst; folders Rijkswaterstaat Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Sumner, E.J., A.A. Lawrence & P.J. Talling (2008). Deposit Structure and Processes of Sand Deposition from Decelerating Sediment Suspensions. *Journal of Sedimentary Research* Vol. 78, No. 8. P. 529-547.

Swinkels, Cilia M., Jeuken, Claire M.C.J.L., Wang, Zheng B. and Nicholls, Robert J. (2009) Presence of connecting channels in the Western Scheldt Estuary. *Journal of Coastal Research*, 25, (3), 627-640.

Van Braeckel, A., Piesschaert, F. & E. Van den Bergh. (2006). Historische analyse van de Zeeschelde en haar getijgebonden zijrivieren. 19e eeuw tot heden. INBO.R.2006.29. Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel, 178 pp.

Van Braeckel, A.; Coen, L.; Peeters P.; Plancke Y.; Mikkelsen J. en Van den Bergh, E. (2012). Historische evolutie van Zeescheldehabitats. Kwantitatieve en kwalitatieve analyse van invloedsfactoren. Rapporten van het Instituut voor

Natuur- en Bosonderzoek 2011 (INBO.R.2011. 57). Instituut voor Natuur- en Bosonderzoek, Brussel.

Van den Berg, J.H., Gelder, A. van & Mastbergen, D.R. (2002). The importance of breaching as a mechanism of subaqueous slope failure in fine sand. *Sedimentology* 49, pp 81 - 95.

Van der Spek, A.J.F. (1994). Large-scale evolution of Holocene tidal basins in the Netherlands. Proefschrift Universiteit Utrecht, Faculteit Aardwetenschappen: Utrecht. 191 pp.

Van Eck, G.Th.M. & Holzhauer, H. (Ed.) (2007). Monitoring van de effecten van de verruiming 48'/43': MOVE eindrapport 2006 (Rapport 10). Rapport RIKZ-2007.003.

Van Straaten, L. M. J. U. & Kuenen, P. H. (1957): Accumulation of Fine-grained Sediments in the Dutch Wadden Sea. *Geologie en Mijnbouw (NW. Ser.)* Vol 19, p. 329-354.

Van Strydonck, M. & G. de Mulder, red. (2000). *De Schelde; Verhaal van een rivier*. Leuven.

Van Zanten, E. & L.A. Adriaanse. (2008) Verminderd getij; Verkenning naar mogelijke maatregelen om het verlies van platen, slikken en schorren in de Oosterschelde te beperken. Hoofdrapport.

Vos.P.C., P.L.de Boer, P.L. & R. Misdorp, (1988) Sediment stabilization by benthic diatoms in intertidal sandy shoals. In: P.L. de Boer et al. (reds.) *Tide-Influenced Environment and Facies*, 511-526.

Vos P.C. & van Heeringen R.M.(1997), -Holocene geology and occupation history of the province of Zeeland. Mededelingen Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, 59, pp. 5-109.

Vroon, J.; Storm, C.; Coosen, J. (1993) *Westerschelde, stram of struis?* Ministerie van Verkeer en Waterstaat DG Rijkswaterstaat, Rijksinstituut voor Kust en Zee.

Ysebaert, T.J.; Plancke, Y.; Bolle, L.J.; De Mesel, I.G.; Vos, G.; Wielemaker-Van den Dool, A.; van der Wal, D.; Herman, P.M.J. (2009). *Habitatmapping Westerschelde: deelrapport 2. Ecologische karakteristieken en ecotopen in het subtidaal van de Westerschelde*. Nederlands Instituut voor Ecologie (NIOO -KNAW). Centrum voor Estuariene en Mariene Ecologie: Yerseke. 106 pp.

LTV V&T

Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, 2013:

- Data-analyse waterstanden Westerschelde. LTV V&T-rapport G-1
- Grootchalige sedimentbalans van de Westerschelde. LTV V&T-rapport G-2
- De rol van het slib in de sedimentbalans van de Westerschelde. LTV V&T-rapport G-3
- Influence morphology on tide and sand transport. LTV V&T-rapport G-4
- Data-analysis water levels, bathymetry Western Scheldt. LTV V&T-rapport G-5
- Tidal Phenomena in the Scheldt Estuary, part 2. LTV V&T-rapport G-7
- Aanvullend onderzoek historische ontwikkeling getij. LTV V&T-rapport G-8
- Probleemanalyse zandwinning. LTV V&T-rapport G-10
- Simulaties met effectanalyse op schaal estuarium. LTV V&T-rapport G-11
- Effect morfologie monding Westerschelde op getij. LTV V&T-rapport G-12
- Synthese en conceptueel model. LTV V&T-rapport G-13
- Response of tidal rivers to deepening and narrowing. LTV V&T-rapport G-14
- Ontwikkeling mesoschaal Westerschelde (factsheets). LTV V&T-rapport K-16
- Samenhang ontwikkelingen tijd- en ruimteschalen. LTV V&T-rapport K-17
- Ontwikkeling mesoschaal Zeeschelde (factsheets). LTV V&T-rapport K-18
- Zeeschelde- nota analyse bodemligging. LTV V&T-rapport K-19
- Simulaties met effectanalyse op mesoschaal. LTV V&T-rapport K-20
- Analyse havenstortvak W13. LTV V&T-rapport B-21
- Analyse alle havenstortvakken Westerschelde. LTV V&T-rapport B-22

- Analyse stortvakken Beneden-Zeeschelde. LTV V&T-rapport B-23
- Gebruik van nevengeulen voor binnenvaart. LTV V&T-rapport B-24
- Mitigatie dwarsstroming Zuidergat. LTV V&T-rapport B-25
- Actualisatierapport Finel 2D Schelde-estuarium. LTV V&T-rapport A-26
- Actualisatierapport Delft3D Schelde-estuarium. LTV V&T-rapport A-27
- Harde lagen Westerschelde. LTV V&T-rapport A-28
- Harde lagen Beneden-Zeeschelde. LTV V&T-rapport A-29
- Overzicht data, beschikbaarheid Open Earth, ftp. LTV V&T-rapport A-30
- Baggeren en storten. LTV V&T-rapport A-31

Plancke, Y; Maximova, T; Ides, S; Peeters, P; Taverniers, E.; Mostaert, F. (2012).
 Werkgroep O&M - Projectgroep Veiligheid: Sub project 1: Data Analysis
 and hypothesis - Lower Sea Scheldt. Version 4.0. WL rapporten, 756/05.
 Flanders Hydraulics Research: Antwerp, Belgium

Consortium Deltares-IMDC-Svasek-Arcadis, Waterbouwkundig Laboratorium,
 2013. LTV V&T-rapport G-9: Toepassing van de Vlaamse en de
 Nederlandse methodes om het overstromingsrisico te bepalen van
 dijkkring 31, Zuid-Beveland.

Vandenbruwaene, W.; Vos, G.; Plancke, E.; Mostaert, F. (2012). Werkgroep O&M
 - Projectgroep Veiligheid en Toegankelijkheid: Onderzoek naar de
 morfologie op mesoschaal ter hoogte van de stortlocaties. Versie 3.0. WL
 rapporten, 791/10a. Waterbouwkundig Laboratorium: Antwerpen, België